

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки **13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)**

Отделение **Электроэнергетики и электротехники**

Профиль **Электропривод и автоматика**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Электропривод переменного тока станка формирования отверстий

УДК 62-83:621.952

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Королев Александр Вячеславович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов И.Г.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук И.В.	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. зав. кафедрой- руководителя
ОЭЭ ИШЭ

_____ А.С. Ивашутенко
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г5А1	Королеву Александру Вячеславовичу

Тема работы:

Электропривод переменного тока станка формирования отверстий	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№58-27/с от 27.02.2020г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.2020г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация, методические пособия по станочным электроприводам
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Изучение работы станка формирования отверстий, привода перемещения по координате. Рассмотрение теоретических основ векторного управления синхронным двигателем, расчет контуров тока, скорости и положения. Расчет задания перемещения на 10 см.
Перечень графического материала	Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат в среде Matlab Simulink.

	Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат Matlab Simulink. Графики переходных процессов при пуске двигателя, набросе нагрузки, и остановке в заданном положении.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кашук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна
Названия разделов которые должны написаны на русском и иностранном языках	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.03.2020г.
---	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Учёная степень звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов И.Г.	Кандидат технических наук		20.03.2020г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Королев Александр Вячеславович		20.03.2020г..

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

Период выполнения весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.2020г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.05.2020	Основная часть	60
15.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
18.05.2020	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов И.Г.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

И. о. зав. кафедрой- руководителя ОЭЭ ИШЭ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г5А1	Королев Александр Вячеславович

Школа	Энергетика	Отделение (НОЦ)	ИШЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электропривод и автоматика

Тема ВКР:

Электропривод переменного тока станка формирования отверстий	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Электропривод перемещения по координате станка формирования отверстий в керамическом листе печатной платы.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» ГН 2.2.5.3532-18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны"*[17]
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего 2. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде 3. Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами химического воздействия на организм работающего человека
3. Экологическая безопасность:	1. Загрязнение атмосферы 2. Загрязнение гидросферы 3. Загрязнение литосферы
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Взрыв, пожар, выброс химических веществ Пожароопасность

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Королев Александр Вячеславович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО		
3-5Г5А1	Королев Александр Вячеславович		
Школа	ИШЭ	Отделение Школа	Энергетика
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Королев Александр Вячеславович		

Реферат

Ключевые слова: синхронный двигатель, векторное управление, контур тока, контур скорости, энкодер.

В данной выпускной квалификационной работе рассматривается расчет и моделирование системы, основанной на синхронном двигателе с постоянными магнитами, с использованием математического пакета MATLAB 2019b.

Целью работы является построение системы управления двигателем, обеспечивающей требуемые динамические и энергетические показатели качества управления, и работа в системе абсолютного позиционирования с заданной точностью.

Результатом работы являются разработанная система управления, настроенные коэффициенты регуляторов скорости, токов и положения, а также переходные характеристики процессов.

Работа содержит 91 страницу текста, 26 рисунков, 26 таблиц и 33 источника литературы.

Содержание

Введение.....	11
1. Построение следящего электропривода	13
1.1 Общий обзор конструкции установки	13
1.2 Общие понятия о векторном управлении.....	24
1.3 Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами	28
1.4 Модель синхронной машины во вращающейся системе координат	33
2 Синтез контуров регулирования синхронным электроприводом.....	37
2.1 Синтез и анализ САУ РЭП.....	37
2.2 Оптимизация контура тока	39
2.3 Оптимизация контура скорости	42
2.4 Оптимизация контура положения	45
3. Имитационное моделирование следящего электропривода.....	47
Выводы по разделу	51
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	52
Введение.....	52
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	53
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	53
4.1.2 SWOT-анализ	54
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	58
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	58
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	59

4.2.3 Бюджет научно-технического исследования и запуска продукции в серию	63
4.2.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	63
4.2.3.2 Расчет амортизации специального оборудования	64
4.2.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	65
4.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)....	68
4.2.3.5 Накладные расходы	68
4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ..	70
Выводы по разделу	74
5. Социальная ответственность	75
Введение	75
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	76
5.2.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	77
5.3 Производственная безопасность	78
5.4 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	79
5.4.2 Превышение уровня шума	80
5.4.3 Воздействие химических веществ на организм человека	81
5.6 Экологическая безопасность.....	82
5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	83
Выводы по разделу	84
Заключение	85
Conclusion.....	86
Список литературы	87

Введение

Постоянное совершенствование технологий и развитие точного электрооборудования приводит к созданию новых и преобразованию старых устройств. Такому совершенствованию подвергаются и электрические машины, которые неоднократно преобразовывались для получения точного позиционирования. При массовом внедрении полупроводниковых приборов появилась возможность заменить классические щетки на р-n переходы, в результате чего был создан бесколлекторный двигатель.

Конструктивно бесколлекторный двигатель постоянного тока представляет собой разновидность синхронного двигателя.

В его состав входят:

- Ротор, как правило, из магнитного материала, реагирующий на воздействие электромагнитного поля.
- Статор, включающий в себя фазы обмоток, намотанные в катушки станину и диэлектрическую прокладку.
- Измерительные датчики (чаще всего Холла), позволяющие определить положение вращения вала.
- Микропроцессорный блок, формирующий импульсы, их форму, задающие частоту вращения ротора, сравнивающий показания датчиков и подаваемого переменного тока на фазные обмотки.

На данный момент данный тип двигателей является наиболее перспективным для регулируемого электропривода. Они имеют целый ряд

преимуществ перед асинхронными двигателями и двигателями постоянного тока, а именно:

- Меньшие масса и габариты при одинаковой мощности;
- Широкий диапазон изменения частоты вращения;
- Высокая перегрузочная способность по моменту;
- Большой срок службы и высокая надежность.

Основной недостаток таких двигателей заключается в высокой стоимости постоянных магнитов, поэтому, до недавнего времени, двигатели такого типа устанавливались только на высокоточные станки с ЧПУ, роботы и в военную технику. Но на данный момент наметилась стойкая тенденция к снижению стоимости подобных двигателей, в связи с открытием технологии более дешевых высококоэрцитивных постоянных магнитов. Подобные открытия вносят свой вклад в постепенному внедрению этих двигателей в общегражданской, а соответственно и широкодоступной, технике, такой как: приводы компрессоров, циркуляционных насосов, систем вентиляции и так далее. В свою очередь подобные решения позволяют уменьшить габариты привода и сделать его более управляемым. Более того, в последние годы наметилась стойкая тенденция к постепенному вытеснению асинхронных и коллекторных двигателей их бесколлекторными синхронными аналогами, а факторы отсутствия щеток и высокий КПД на пониженной частоте вращения делают этот тип двигатель практически идеальным решением для энергосберегающего электропривода.

1. Построение следящего электропривода

1.1 Общий обзор конструкции установки

В РАМ S-серии используется одиночный штыревой инструмент для пробивки отверстий и отверстий для совмещения в сырой керамической ленте, с майларовой пленкой или без неё. Размер каждого отверстия пробивается с использованием различных инструментов.

В зависимости от версии установки может быть установлено до 4 или 8 пробивочных инструментов, либо же инструмент для пробивки нескольких отверстий одновременно (матрица или штамп). В зависимости от требований к процессу автоматизации доступны различные системы загрузки – ручная загрузка/выгрузка листов (стандартная конфигурация), автоматическая загрузка/выгрузка из кассеты в кассету (автомат).

Работа установки заключается в пробивке переходных отверстий и отверстий для совмещения в сырой керамической ленте. Кроме того, возможна пробивка отверстий различной формы.

Базовая техническая информация представлена в таблице 1.1.1.

Таблица 1.1.1 – Общие характеристики установки РАМ-8SM

Режим работы	Автоматический/ручной
Область пробивки	8x8 дюймов (203x203 мм)
Способ удержания листа	Вакуум
Диаметр отверстия	5 мм (макс) 0,1 мм (мин)
Инструменты пробойника	Ø 0,15 мм Ø 0,2 мм □ 2 мм Ø 5 мм
Контроль обработки	Компьютер
Программирование очередности	CAD-CAM в виде DXF NC файлы Ручной ввод координаты
Питание	220В; 50 Гц
Воздух, давление/расход	0,6 МПа / 300 л/мин.
Вакуум, давление/расход	0,8 бар (0,1 бар абсолютное) / 300 л/мин.
Рабочая температура	15 - 25°C
Влажность	Не больше 80% (без конденсата)
Размеры	Длина – 1350 мм Ширина – 1520 мм Высота – 1750 мм
Вес	750 кг

Технологический процесс работы с установкой выглядит следующим образом: заранее подготовленные керамические листы загружаются стопкой в кассету, предназначенную для хранения и перемещения заготовок. Автоматический вакуумный инструмент подхватывает одиночный лист керамики и укладывает его на загрузочную платформу, после чего вакуумный захват, представляющий из себя рамку, подхватывает лист и уносит его на пробивку переходных отверстий.

Перемещаясь по осям X, Y захват движется над посадочной матрицей, в то время пока пневмо-инструмент (игла) формирует отверстия согласно заданной программе. По окончании процесса пробивки захват выгружает пробитую заготовку на платформу, откуда его забирает вакуумный хват укладывая его во вторую кассету.



Рисунок 1.1.1. Общий вид установки PAM-8SM

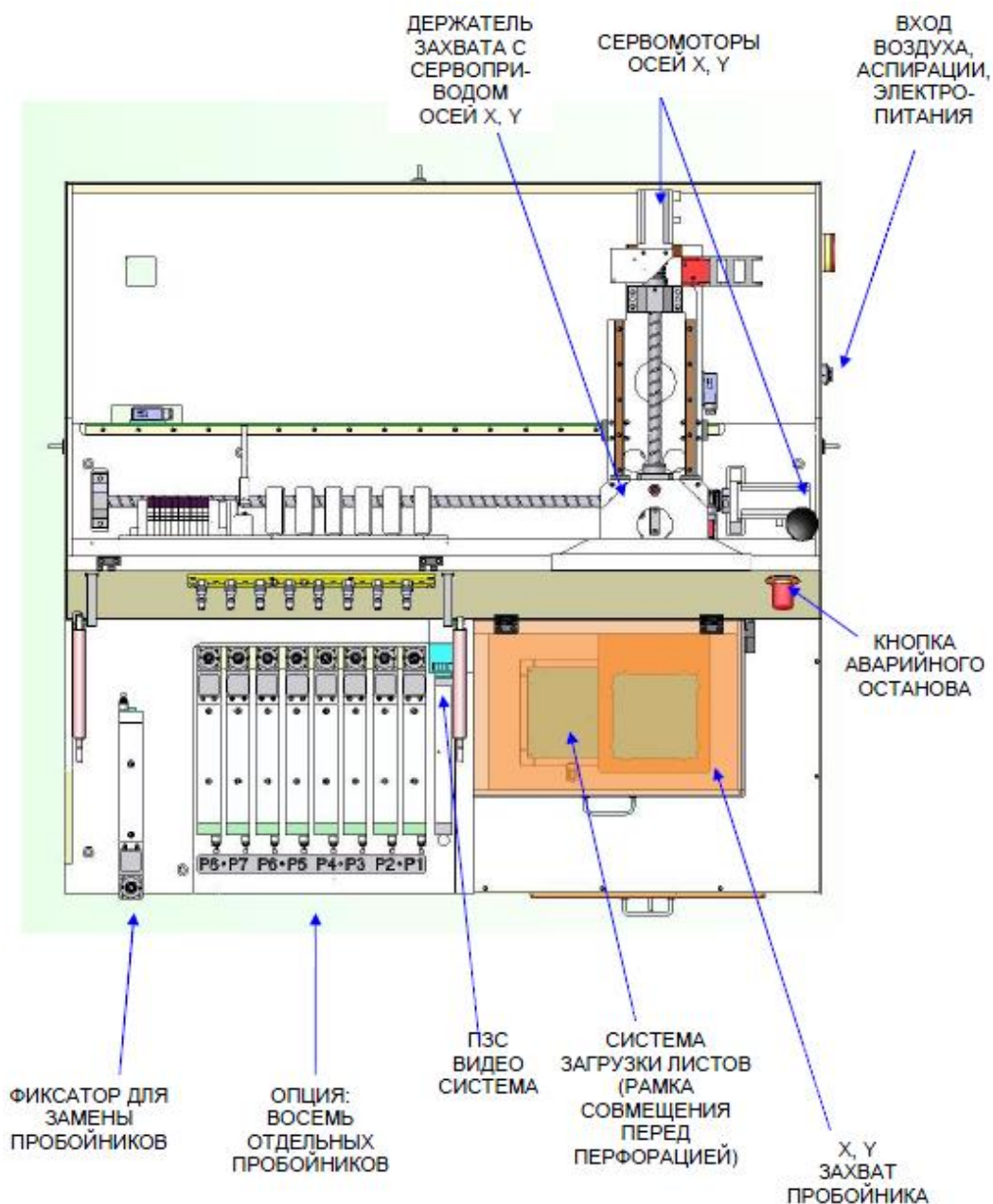


Рисунок 1.1.2. Основные узлы машины

Для перемещения рамки по осям X и Y, используются две шариковинтовые передачи, с ходом 5 мм за один оборот двигателя.

Таблица 1.1.2 – Технические характеристики ШВП применяемых в установке

Модель	Диаметр, мм	Перемещение мм/оборот	Длина вина мм	Масса, кг
RM1605	16	5	1500	2,5



Рисунок 1.1.3. Шарико-винтовая передача для перемещения рамки по оси X

Для работы по перемещению используются сервоприводы серии Melservo MR-J3-20A производства компании Mitsubishi electric. Работа привода осуществляется от питания 3-х фазного или однофазного напряжения.

Возможны три режима: режим управления положением, режим управления скоростью и режим управления моментом. Кроме того, в смешанном режиме возможно переключение между различными режимами, например, режим управления положением/скоростью, режим управления скоростью/моментом, режим управления моментом/положением.

Все серводвигатели серии MELSERVO-J3 стандартно оснащены абсолютным энкодером. При этом повышенная разрешающая способность в 262144 импульсов на оборот позволяет использовать дополнительные регулирующие функции для компенсации резонанса механизма.

Система абсолютного позиционирования в сервоусилителе активируется после присоединения батареи буферного питания. Если используется режим абсолютного позиционирования, то после однократной настройки референтной точки ее не потребуется настраивать повторно после исчезновения сетевого напряжения или возникновения сигнализации.

Частота и направление вращения задаются с помощью серии импульсов с частотой 10000 импульсов в секунду). В сочетании с разрешающей способностью энкодера 262144 имп/оборот это означает возможность прецизионного позиционирования.

Функция сглаживания позволяет плавно запускать и останавливать машину после поступления команды позиционирования. В зависимости от применения, для функции сглаживания можно выбрать один из двух режимов.

Для защиты подключенной нагрузки от резких изменений крутящего момента или слишком высоких значений крутящего момента в отдельных рабочих точках установки можно активировать ограничение крутящего момента. Предельное значение подается через аналоговый вход или задается внутри, с помощью параметра.

Основные технические характеристики сервоусилителя представлены в таблице 1.1.3.

Таблица 1.1.3 – Основные технические данные сервоусилителя

Питание силовой части	Напряжение, В	~200-230
	Частота, Гц	50
Питание блока управления	Напряжение, В	~200-230
	Частота, Гц	50/60
	Потребляемая мощность, Вт	30
Питание интерфейса	Напряжение, В	24 ±10%
	Ток, мА	300
Способ модуляции	Синусоидальная ШИМ модуляция	
Динамический тормоз	Встроен	
Защитные функции	превышение тока, превышение напряжения, перегрузка (электронное термореле), защита от перегрева серводвигателя, ошибка энкодера, перегрузка тормозного контура, пониженное напряжение, исчезновение сетевого напряжения, слишком высокая частота вращения	
Управление положением	Максимальная входная частота, имп.	10000 имп/сек
	Максимальное отклонение	±3 оборота
Управление скоростью	Диапазон задания частоты вращения	аналоговое задание частоты вращения: 1:2000
	Точность поддержания скорости	±0.01 % или менее (колебания нагрузки от 0 до 100 %)
Управление моментом	Ограничение крутящего момента	задание с помощью параметров или через аналоговый вход
	Ограничение частоты вращения	задание с помощью параметров или через аналоговый вход (от 0 до ±10 В/номинальная частота вращения)
Масса	1 кг	

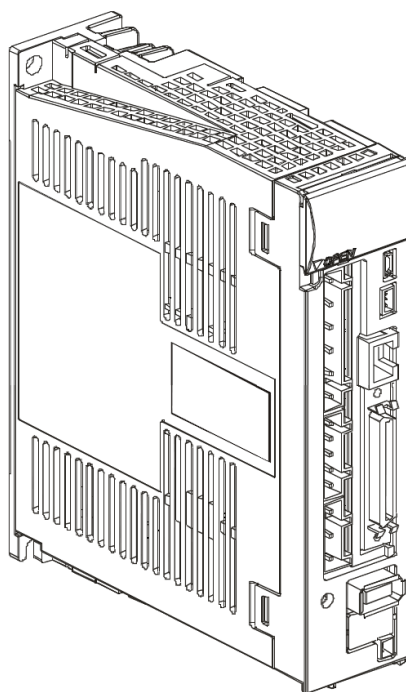
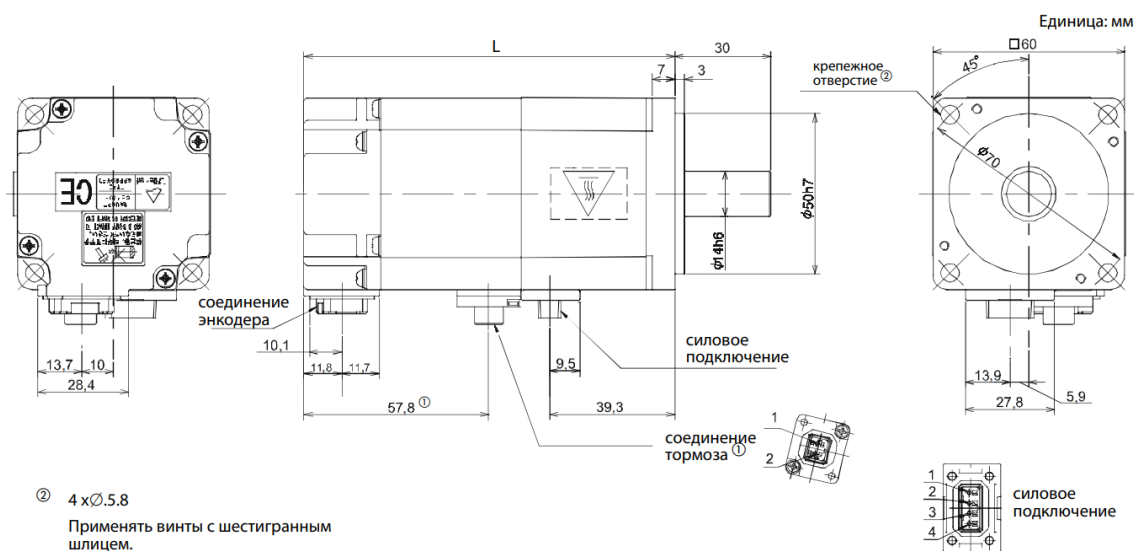


Рисунок 1.1.4. Общий вид модели сервоусилителя MR-J3-20A

В связке с сервоусилителем работает серводвигатель модели HF-KP43.

Основные технические характеристики двигателя представлены в таблице 4.



S001433mC

Рисунок 1.1.5. Общий вид модели серводвигателя HF-KP23

Таблица 1.1.4 – Основные технические данные серводвигателя

Мощность, Вт	200
Номинальный ток, А	1,4
Максимальный ток, А	4,2
Номинальный момент, Нм	0,54
Номинальное напряжение, В	111
Максимальный момент, Нм	1,9
Номинальная скорость вращения, об/мин	3000
Сопротивление обмотки статора, Ом	1,6
Индуктивность статора, Гн	$8,85 \cdot 10^{-3}$
Момент инерции, (кгм ²) (с э/м тормозом)	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Конструктивное дополнение	Энкодер
Разрешение датчика скорости/положения	262144 дискрет на оборот (значение энкодера)
Конструкция	Закрытое исполнение, не вентилируемый (степень защиты IP65)

Точность линейного позиционирования по координате обеспечивается высокоточным энкодером. Энкодер двигателя, предназначенный для использования совместно с сервоусилителем MR-J3, имеет систему определения абсолютной позиции в пределах одного оборота, а также счетчик для суммирования полных оборотов. Система абсолютного позиционирования определяет абсолютное положение машины и записывает его в память с резервным питанием от буферной батареи. Благодаря этому абсолютное положение сохраняется и при отключении питания.

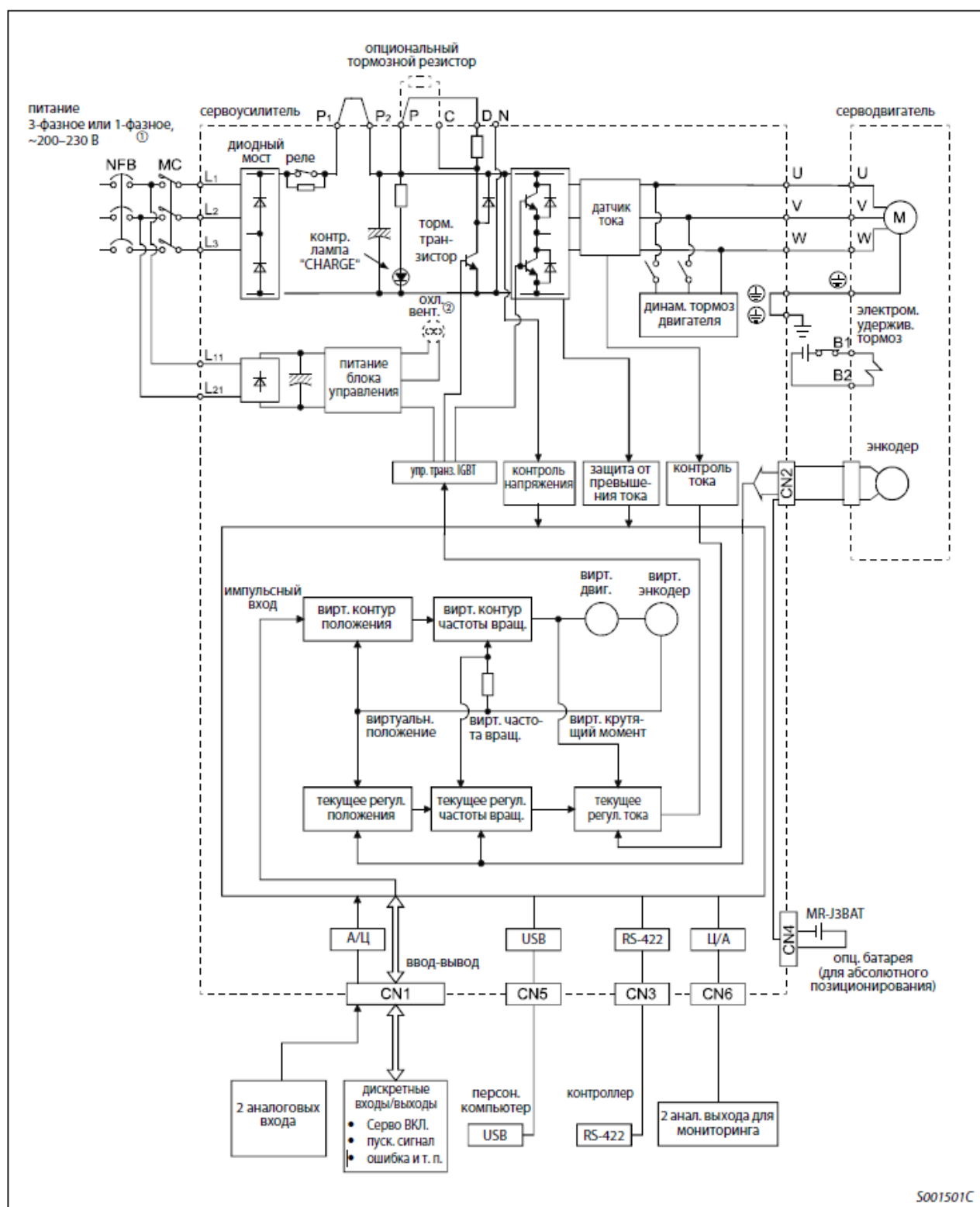


Рисунок 1.1.6. Блок-схема управления двигателем HF-KP23

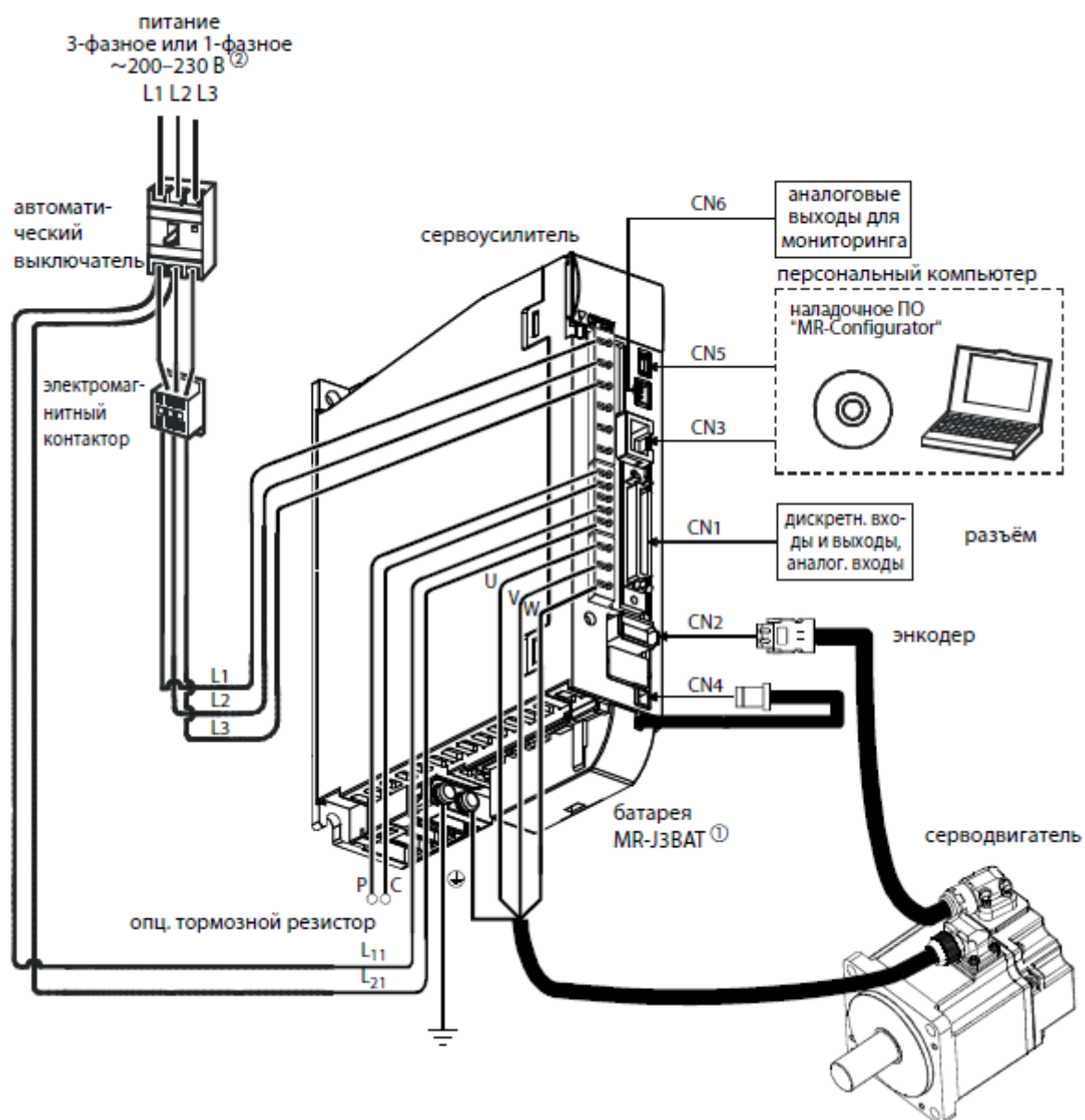


Рисунок 1.1.7. Обзор конфигурации системы MR-J3-20A

1.2 Общие понятия о векторном управлении

В электроприводе с ВД переменного тока используются векторные, или как их частный случай, частотно-токовые алгоритмы автоматического управления моментом и частотой вращения. На протяжении последних 20 лет представление уравнений ВД в роторной системе координат d, q стало основным способом описания его работы, обеспечивающих большую наглядность протекающих процессов. Иногда используется описание в статорной системе координат α, β , при этом значение индуктивности обмоток статора связано тригонометрическими зависимостями с углом поворота ротора, что не так удобно.

При формировании управляющих воздействий трехфазного инвертора напряжения ось абсцисс d ориентируется по направлению продольной оси ротора ВД или, в некоторых случаях, по направлению волны магнитного поля в воздушном зазоре двигателя. Значение тока якоря, по поперечной оси пропорциональное электромагнитному моменту, задается аналогично току якоря классического ДПТ. Таким образом, в системе регулирования реализуется принцип подчиненного регулирования координат, где значение тока якоря по продольной оси d аналогично току возбуждения ДПТ [4].

В векторном управлении применяются следующие системы координат:

1. Неподвижная трехфазная система координат ABC.

Система имеет три оси, расположенные под углом 120 градусов друг к другу и пересекающиеся в начале координат (рисунок 1.2.1, А). Ток двигателя в этой системе можно представить как вектор, вращающийся вокруг начала координат, а его проекции на оси системы координат пропорциональны мгновенным токам в фазах.

2. Неподвижная Декартова система координат $\alpha\beta$

Система имеет две перпендикулярные оси α и β (рисунок 1.2.1, Б). Одна ось системы совпадает с одной из трехфазных осей ABC, а начало координат совпадает с трехфазной системой. Переход из трехфазной системы в декартову называют также преобразованием Кларка, и он выполняется по следующим формулам:

$$\begin{cases} I_{S\alpha} = I_{SA} \\ I_{S\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{SA} + \frac{2}{\sqrt{3}} I_{SB} \end{cases}$$

3. Вращающаяся система координат dq

Система имеет две перпендикулярные оси d и q , начало координат системы совпадает с началами координат, описанных выше систем (рисунок 1.2.1, В). Оси системы вращаются вокруг начала координат со скоростью вращения ротора. Переход из неподвижной системы во вращающуюся называют преобразованием Парка.

Преобразование Парка выполняется по следующим формулам:

$$\begin{cases} A_d = A_\beta \cdot \sin\varphi - A_\alpha \cdot \cos\varphi \\ A_q = A_\beta \cdot \cos\varphi - A_\alpha \cdot \sin\varphi \end{cases}$$

Как видно из уравнений, для выполнения преобразований необходимо знать угол поворота системы, т.е. ротора двигателя, который нужно измерить или рассчитать [5].

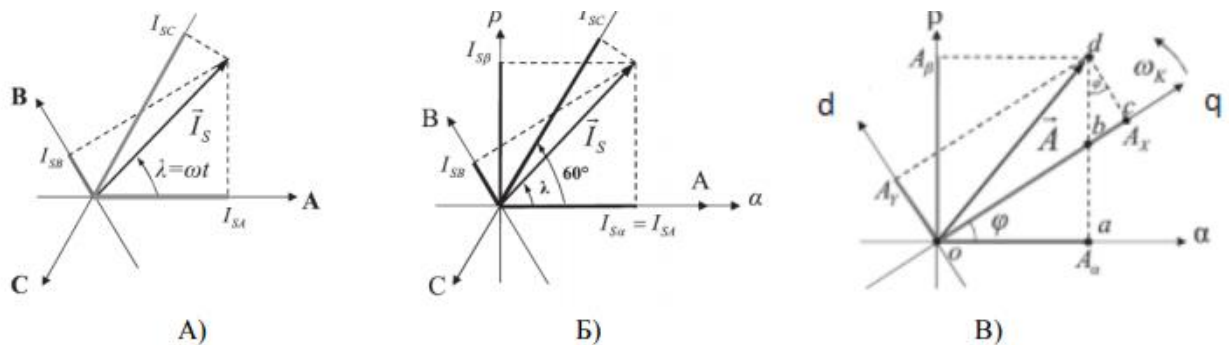


Рисунок 1.2.1. Системы координат

При рассмотрении реальной схемы управления двигателем работа схемы выглядит следующим образом: с помощью датчика тока на обмотке статора измеряются токи фаз U, V, W, и положение ротора двигателя. Токи статора преобразуются в токи двухфазной неподвижной системы координат $\alpha\beta$. Затем эти токи, с использованием сигнала положения вектора потокосцепления θ преобразуются в токи двухфазной, вращающейся со скоростью поля ротора, системы координат. Полученные значения сигналов используются для определения степени ошибки (рассогласования с заданием). В этой системе координат ось q отвечает за регулировку момента двигателя, а ось d регулирует величину магнитного потока статора.

Сигналы рассогласования поступают на внутренние ПИ-регуляторы, на выходе которых формируется сигнал напряжения для задания по осям d и q во вращающейся системе координат, с помощью обратных преобразований Парка, сигналы задания для формирования пространственного вектора управления ШИМ инвертора [1].

Структурная схема вышеописанного представлена на рисунке 1.2.2.

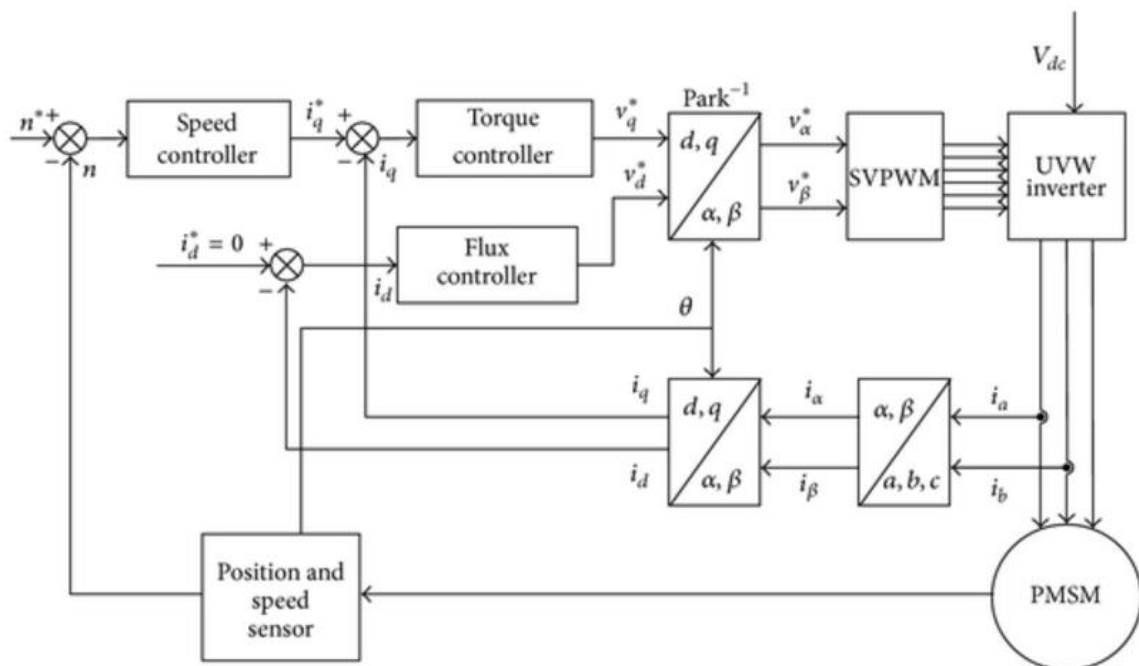


Рисунок 1.2.2. Структурная схема векторной системы управления

бесколлекторным двигателем постоянного тока

1.3 Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами

Физическая модель синхронной машины с постоянными магнитами изображена на рисунке 1.3.1.

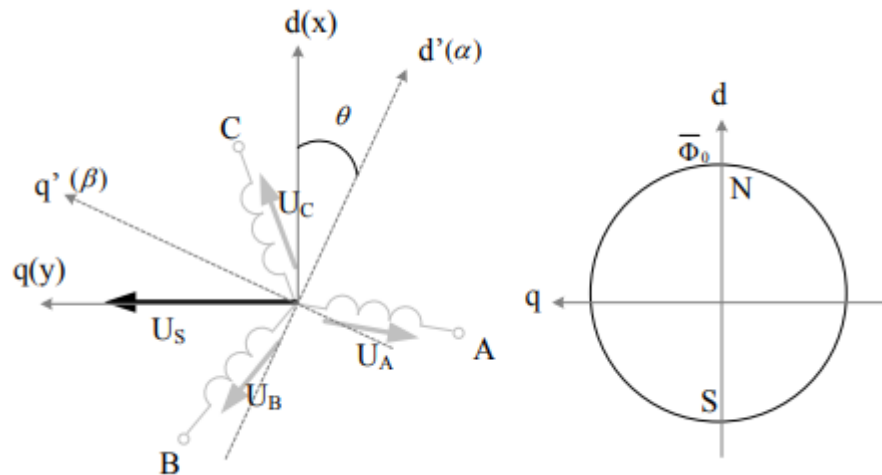


Рисунок 1.3.1. Физическая модель синхронной машины с постоянными магнитами

$\overline{U_A}, \overline{U_B}, \overline{U_C}$ – вектора фазных напряжений

$\overline{U_S}$ – пространственный вектор напряжения

$\overline{\Phi_0}$ – пространственный вектор магнитного потока ротора

$d'q'(\alpha\beta)$ – неподвижная система координат

$dq(xy)$ – вращающаяся система координат

Для построения математической модели синхронного двигателя введем следующие допущения:

1. Отсутствует насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
2. Обмотки статора симметричны;

3. Индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве.

С учетом этих допущений запишем уравнения ЭДС в виде:

$$\begin{cases} U_A = R_A \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt} \\ U_B = R_B \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt} \\ U_C = R_C \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_A = L_A \cdot i_A + \Phi_0 \cdot \cos \omega t \\ \Psi_B = L_B \cdot i_B + \Phi_0 \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \Psi_C = L_C \cdot i_C + \Phi_0 \cdot \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

$\Phi_0 = const$ – магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами

С учетом симметричности обмоток:

$$R_A = R_B = R_S$$

$$L_A = L_B = L_S$$

Для упрощения математического описания синхронной машины воспользуемся методом пространственного вектора. Суть метода состоит в том, что мгновенные значения симметричных трехфазных переменных состояния (напряжения, токи, потокосцепления) можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором [5]. Разберем этот метод на примере тока статора:

$$\bar{i}_S = \frac{2}{3}(i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C)$$

$$\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad - \quad \text{вектора,}$$

учитывающие пространственное смещение обмоток

Для преобразования уравнений в мгновенных значениях к уравнениям в пространственных векторах умножим первое уравнение на $\frac{2}{3}$, второе на $\frac{2}{3}\bar{a}$, третье на $-\frac{2}{3}\bar{a}$, и сложить, для получения базиса (АВС)

$$\begin{cases} \bar{U}_S = R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} \\ \bar{\Psi}_S = L_S \cdot \bar{i}_S + \Phi_0 \cdot e^{j\omega t} = L_S \cdot \bar{i}_S + \bar{\Phi}_0 \end{cases}$$

L_S – индуктивность статора

$\bar{\Psi}_S$ – вектор потокосцепления статора

$\bar{\Phi}_0$ – вектор магнитного потока от постоянных магнитов ротора

Электромагнитный момент на валу двигателя:

$$M = \frac{3}{2} z_p \cdot |\bar{\Psi}_S \cdot \bar{i}_S|$$

Уравнения равновесия моментов на валу двигателя^

$$J \frac{d\omega_M}{dt} = M - M_c$$

$\omega_M = \frac{\omega_e}{z_p}$ – скорость вращения ротора

z_p – число пар полюсов

Модель синхронной машины в неподвижной системе координат

При составлении модели синхронного двигателя, исходный синхронный двигатель заменяется эквивалентной двухфазной машиной.

Метод пространственного вектора позволяет записать уравнения для $(\alpha\beta)$.

Уравнения синхронной машины в базисе ($\alpha\beta$):

$$\begin{cases} \bar{U}_S = R_S \cdot i_S + L_S \cdot \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\omega_i \cdot z_p \cdot \bar{\Psi}_S \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot |\bar{\Psi}_S \cdot i_S| \\ J \frac{d\omega_i}{dt} = M - M_c \end{cases}$$

При переходе в двух координатный базис ($\alpha\beta$) в уравнении появилась новое слагаемое. В этом случае уравнения запишутся в следующем виде:

$$\begin{cases} U_{S\alpha} = R_S \cdot i_{S\alpha} + L_S \cdot \frac{d\bar{i}_{S\alpha}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_\beta \\ U_{S\beta} = R_S \cdot i_{S\beta} + L_S \cdot \frac{d\bar{i}_{S\beta}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_\alpha \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (\Psi_\alpha \cdot i_{S\beta} - \Psi_\beta \cdot i_{S\alpha}) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \end{cases}$$

Проекция вектора потокоцепления на оси $\alpha\beta$:

$$\begin{cases} \Psi_\alpha = \Psi_S \cdot \cos \omega t = L_\alpha \cdot i_{S\alpha} + \Phi_0 \cdot \cos \omega t \\ \Psi_\beta = \Psi_S \cdot \sin \omega t = L_\beta \cdot i_{S\beta} + \Phi_0 \cdot \sin \omega t \end{cases}$$

L_α, L_β - индуктивности обмоток статора по продольной и поперечной осям ротора

При этом учитываем:

$$\bar{\Psi}_S = L_S \cdot \bar{i}_S + \Phi_0 \cdot e^{j\omega t} = L_S \cdot \bar{i}_S + \bar{\Phi}_0$$

Учитывая характеристики машины с постоянными магнитами, вектор магнитного потока будет постоянным:

$$\frac{d\Phi_0}{dt} = 0 \text{ т.к. } \Phi_0 = const$$

Исходя из этого перепишем систему:

$$\begin{cases} U_{S\alpha} = R_S \cdot i_{S\alpha} + L_S \cdot \frac{d\bar{i}_{S\alpha}}{dt} - \omega_M \cdot z_p \cdot L_S \cdot i_{S\beta} - \omega_M \cdot z_p \cdot \Phi_0 \cdot \sin\Theta \\ U_{S\beta} = R_S \cdot i_{S\beta} + L_S \cdot \frac{d\bar{i}_{S\beta}}{dt} + \omega_M \cdot z_p \cdot L_S \cdot i_{S\alpha} + \omega_M \cdot z_p \cdot \Phi_0 \cdot \cos\Theta \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{S\beta} (L_S \cdot i_{S\alpha} + \Phi_0 \cdot \cos\Theta) - i_{S\alpha} (L_S \cdot i_{S\beta} + \Phi_0 \cdot \sin\Theta)) \\ J \frac{d\omega_M}{dt} = M - M_c \end{cases}$$

Структурная схема, соответствующая системе уравнений приведена на рисунке 1.3.2.

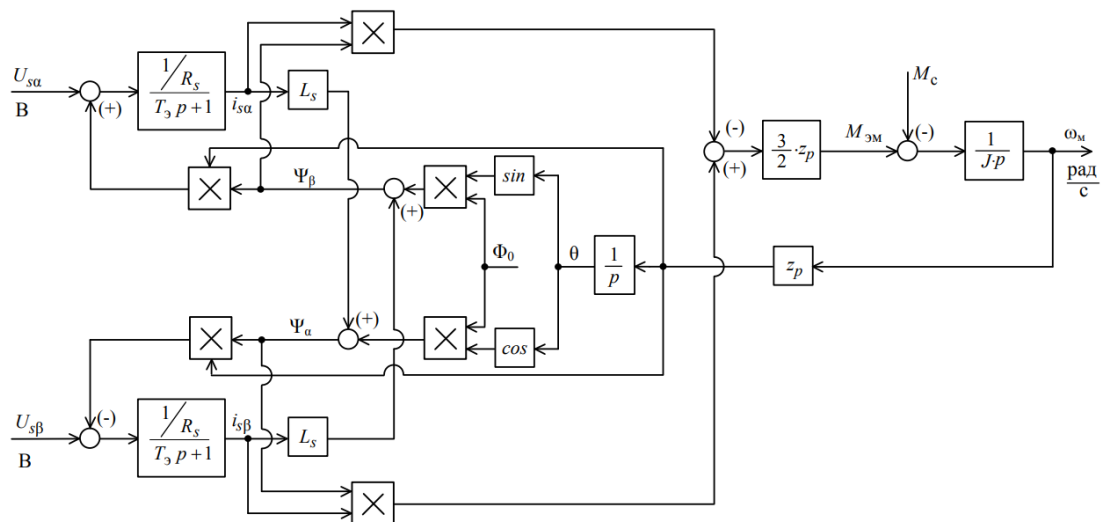


Рисунок 1.3.2. Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами

1.4 Модель синхронной машины во вращающейся системе координат

Введем вращающуюся систему координат с ориентацией положения по ротору, для упрощения динамических процессов при расчетах.

Воспользуемся преобразователем координат, для перехода из вращающейся системы в неподвижную [1]. На рисунке 1.3.1 поясняется математическая основа преобразования.

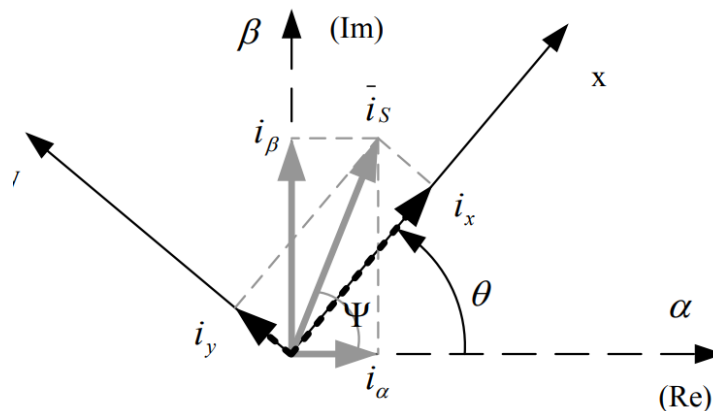


Рисунок 1.4.1. Преобразование координат из вращающейся системы в неподвижную

В неподвижной системе координат, вектора тока, напряжения и потокосцепления могут быть представлены в алгебраической и показательной формах:

$$\vec{i}_s = i_\alpha + j i_\beta = I_m e^{j\Psi}$$

Во вращающейся системе координат:

$$\vec{i}_{s.\text{Вр}} = i_x + j i_y = I_m e^{j(\Psi-\theta)} = \vec{i}_s e^{-j\theta}$$

Исходя из уравнений запишем уравнения перехода из одной системы координат в другую. Системы уравнений, описывающие переход, носят названия прямого и обратного преобразования Парка.

$$\begin{cases} i_x = i_\alpha \cdot \cos\theta + i_\beta \cdot \sin\theta \\ i_y = i_\beta \cdot \cos\theta - i_\alpha \cdot \sin\theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_\alpha = i_x \cdot \cos\theta - i_y \cdot \sin\theta \\ i_\beta = i_x \cdot \sin\theta + i_y \cdot \cos\theta \end{cases}$$

При реализации регуляторов систем электроприводов необходимо учитывать, что реальные токи, протекающие в обмотках статора являются векторами, в неподвижной системе координат, а проектировка регуляторов возможна лишь во вращающейся системе.

Исходя из этого современные регуляторы содержат как прямые, так и обратные преобразователи. Кроме того, они содержат преобразователи фаз $2 \rightarrow 3$ и $3 \rightarrow 2$. Первые преобразователи, преобразовывают токи i_α, i_β в фазные токи i_A, i_B, i_C в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} i_A = i_\alpha \\ i_B = \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta - \frac{1}{2} i_\alpha \\ i_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta - \frac{1}{2} i_\alpha \end{cases}$$

Вторые осуществляют обратное преобразование:

$$\begin{cases} i_\alpha = i_A \\ i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \end{cases}$$

В итоге, схема приобретает следующий вид (рисунок 1.3.2):

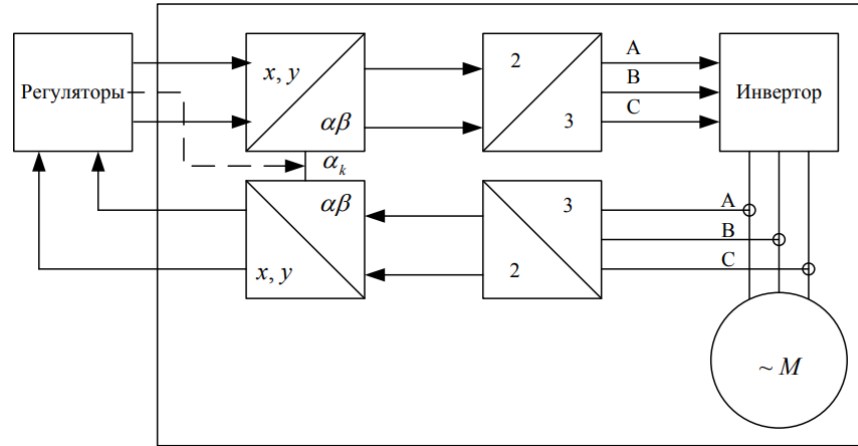


Рисунок 1.4.2. Функциональная схема электрического привода

Для дальнейшего рассмотрения вопросов, связанных с векторным управлением, вводим систему координат dq жестко связанную с ротором. Вектор потока, создаваемого постоянными магнитами ротора синхронной машины, может быть представлен пространственным вектором, неподвижным относительно ротора, и вращающегося вместе с ним. Поэтому, чтобы избавиться от проекции вектора на ось q направим ось d по вектору потока ротора. В этом случае:

$$\begin{cases} \bar{\Phi}_d = \bar{\Phi}_0 \\ \bar{\Phi}_q = 0 \end{cases}$$

Или представив ее в осях dq :

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sd}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_q \\ U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sq}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot \Psi_d \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (\Psi_q \cdot i_{sq} - \Psi_d \cdot i_{sd}) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \end{cases}$$

Проекции вектора потокосцепления на оси dq :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d \cdot i_{sd} + \Phi_0 \\ \Psi_q = L_q \cdot i_{sq} \end{cases}$$

При этом учитываем:

$$\bar{\Psi}_s = L_s \cdot \bar{i}_s + \Phi_0 \cdot e^{j\omega t} = L_s \cdot \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0$$

Исходя из этого перепишем систему:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sd}}{dt} - \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{sq} \\ U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sq}}{dt} + \omega_m \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{sd} + \omega_m \cdot z_p \cdot \Phi_0 \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{sd}(L_s \cdot i_{sq}) - i_{sq}(L_s \cdot i_{sd} + \Phi_0)) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \end{cases}$$

Структурная схема, соответствующая системе уравнений приведена на рисунке 1.3.3.

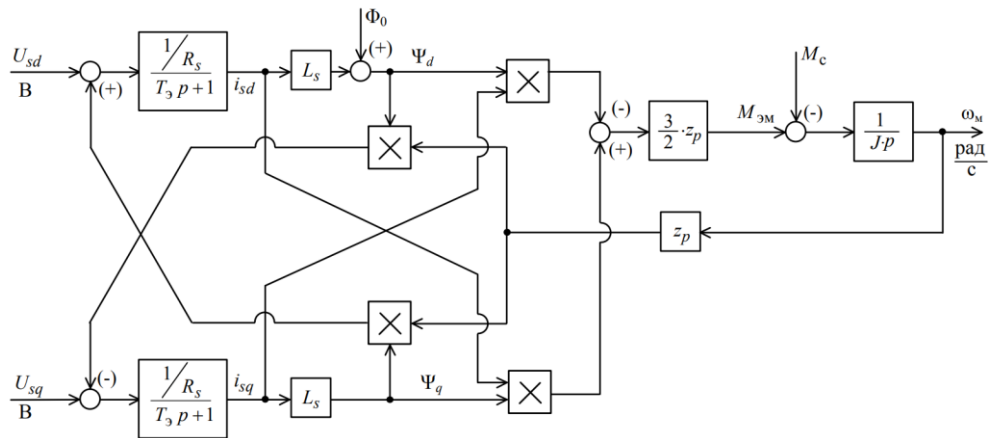


Рисунок 1.4.3. Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат

2 Синтез контуров регулирования синхронным электроприводом

2.1 Синтез и анализ САУ РЭП

Структурная схема линеаризованной системы автоматического управления регулируемого электропривода приведена на рисунке 2.1.1.

На схеме приняты следующие обозначения:

$W_{\text{рtd}}(p), W_{\text{ртq}}(p), W_{\text{рс}}(p)$ – регуляторы тока и скорости,

$W_{\text{вх.ф}}(p)$ – входной фильтр,

$k_{\text{от}}$ – коэффициент обратной связи по току,

$k_{\text{ос}}$ – коэффициент обратной связи по скорости,

$T_{\mu\text{то}}$ – малая постоянная времени в цепи обратной связи контура тока.

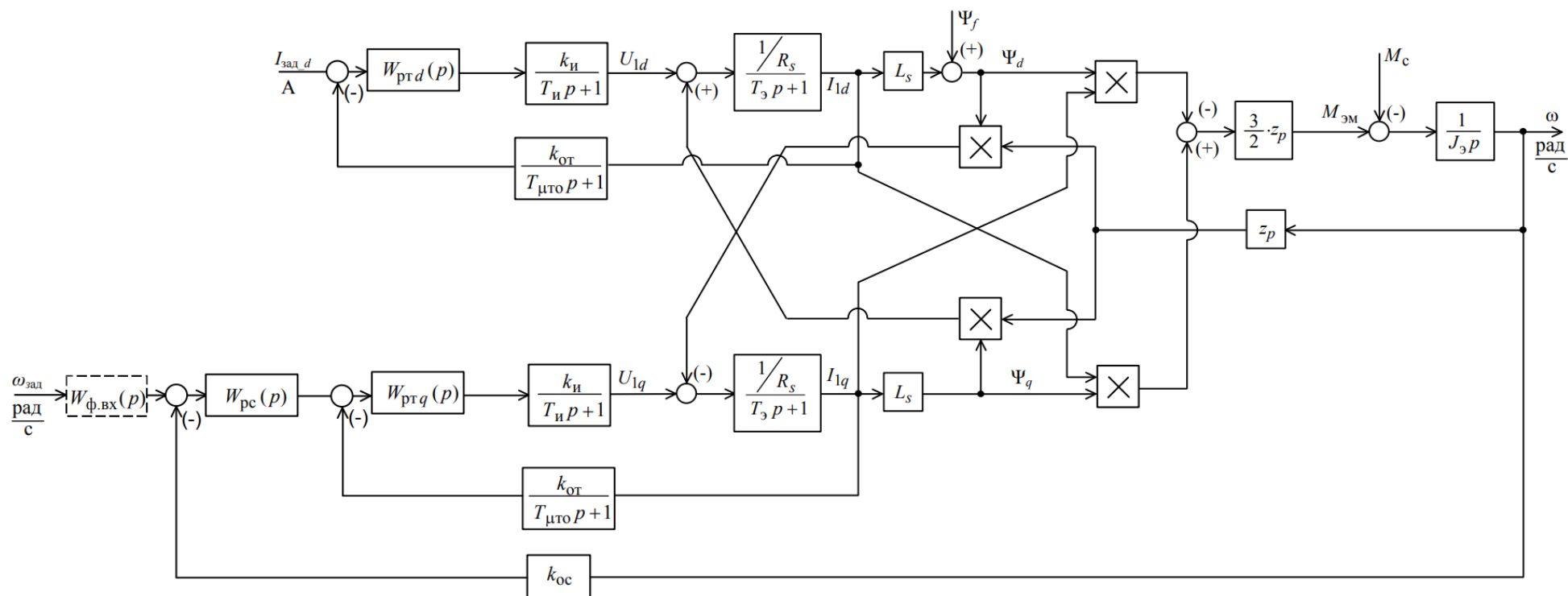


Рисунок 2.1.1. Структурная схема линейризованной САУ РЭП

2.2 Оптимизация контура тока

Структурная схема контура тока приведена на рисунке 3.2.1. Контур I_d , I_q одинаковые. Оптимизацию проведем на примере контура I_q .

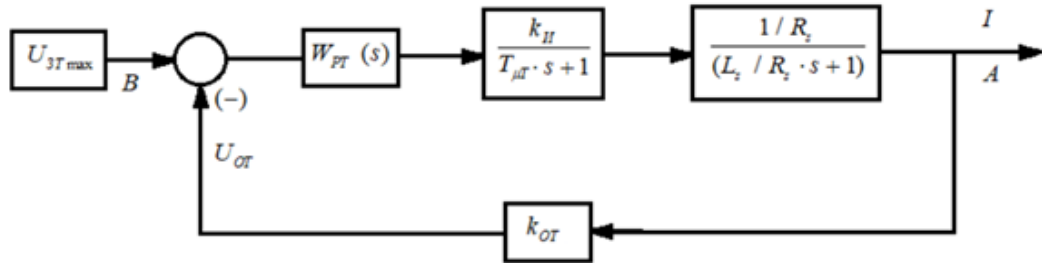


Рисунок 3.2.1. Контур тока

Оптимизация проводится без учёта влияния обратной связи по ЭДС двигателя и влияния изменения угла между вектором потока от постоянных магнитов и вектором напряжений.

Так как максимальный ток двигателя составляет 4,2 А, то и максимальный ток преобразователя не может превышать это значение. Исходя из этого определим коэффициент обратной связи по току:

$$k_{OT} = \frac{U_{3T max}}{I_{max}} = \frac{10}{4,2} = 2,3 \text{ В/А}$$

Частота широтно-импульсной модуляции:

$$f_{шим} = 10 \text{ кГц}$$

Постоянная времени инвертора:

$$T_{шим} = T_{\mu T} = \frac{1}{f_{шим}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ сек}$$

$T_{\mu T}$ – наименьшая некомпенсируемая постоянная времени контура тока

Контур тока оптимизируем по модульному оптимуму.

Передаточная функция разомкнутого контура тока, оптимизированного по модульному оптимуму представлена ниже:

$$W_{\text{PKT}}^{\text{MO}}(s) = W_{\text{PT}}(s) \cdot W_{\text{OY1}}(s) \cdot W_{\text{OY2}}(s) \cdot k_{\text{OT}} = \frac{1}{2 \cdot s \cdot T_{\mu T} \cdot (s \cdot T_{\mu T} + 1)}$$

$W_{\text{PT}}(s)$ – передаточная функция регулятора тока

$$W_{\text{OY1}}(s) = \frac{k_{\text{и}}}{T_{\text{и}} \cdot s + 1} - \text{передаточная функция инвертора}$$

Коэффициент усиления инвертора:

$$k_{\text{инв}} = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{ЗТ}}} = \frac{111}{10} = 11,1$$

Передаточная функция цепи статора:

$$W_{\text{OY2}}(s) = \frac{1/R_s}{(L_s/R_s \cdot s + 1)}$$

L_s – индуктивность обмотки статора;

R_s – сопротивление обмотки статора.

Передаточная функция регулятора тока:

$$W_{\text{PT}}(s) = k_T \frac{T_{\text{PT}} \cdot s + 1}{T_{\text{PT}} \cdot s}$$

Коэффициент пропорциональности ПИ-регулятора:

$$k_T = \frac{L_s}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot k_{\text{OT}} \cdot k_{\text{и}}} = \frac{0,00885}{2 \cdot 0,0001 \cdot 2,3 \cdot 11,1} = 1,67$$

Постоянная времени регулятора тока:

$$T_{\text{PT}} = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0,0085}{1,6} = 0,0053$$

Ожидаемые показатели качества работы контура тока:

Используя функцию линейного анализа замкнутого контура, проведем исследование контура тока (рисунок 2.2.2).

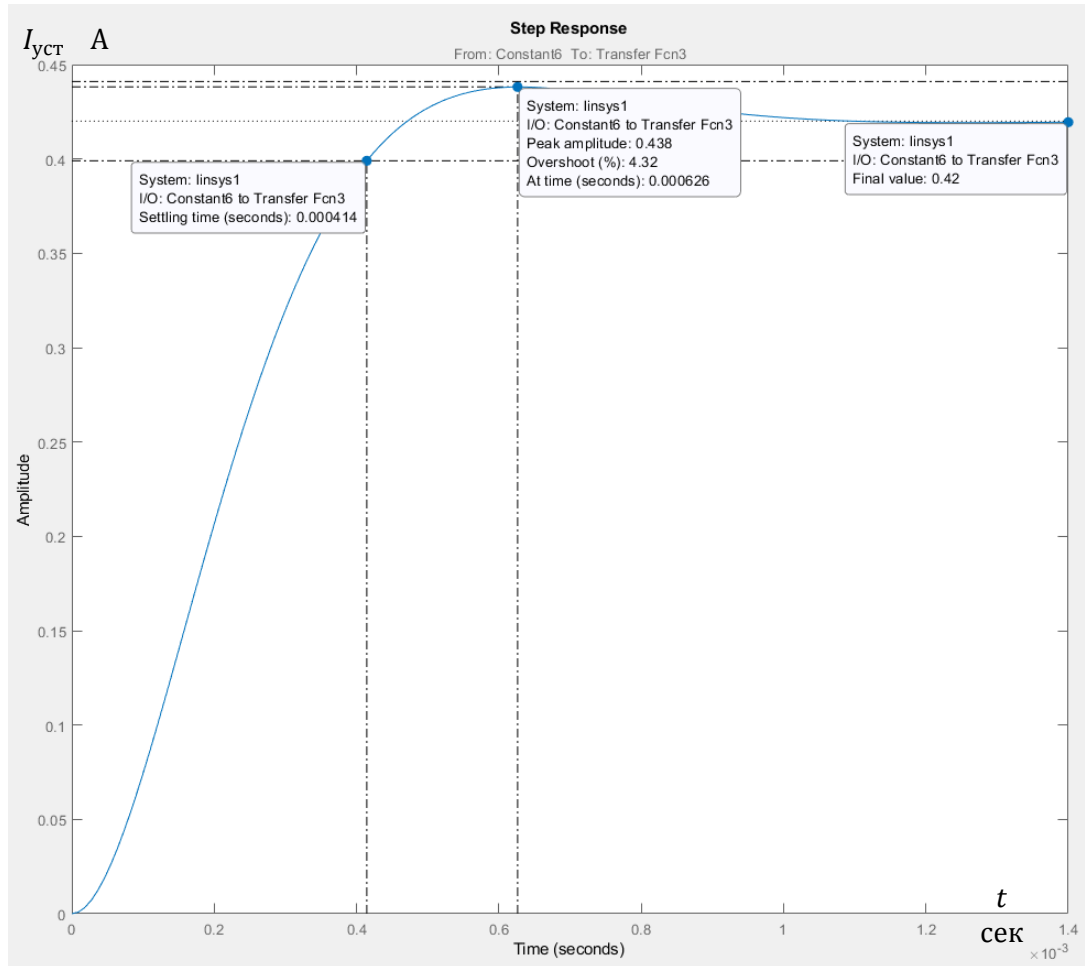


Рисунок 2.2.2. График переходного процесса в контуре тока

Проанализировав график получим:

1. установившаяся ошибка $\Delta I_{уст} = 0$
2. перерегулирование $\sigma = 4,32\%$
3. время первого и окончательного вхождения в 5% зону при отработке ступенчатого задания $t_{py1} = t_{py2} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 0,000414$ сек

2.3 Оптимизация контура скорости

Структурная схема контура скорости приведена на рисунке 2.3.1.

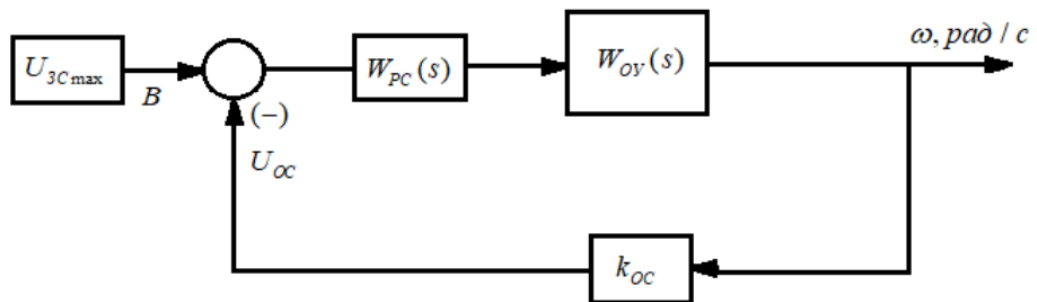


Рисунок 2.3.1. Структурная схема контура скорости

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$k_{oc} = \frac{60 \cdot U_{3C \max}}{n_n \cdot 2\pi} = \frac{60 \cdot 10}{3000 \cdot 2 \cdot 3,14} = 0,032$$

$U_{3C \max}$ – напряжение, соответствующее заданию максимальной скорости, В

Контур скорости оптимизируем на симметричный оптимум.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости, оптимизированного на симметричный оптимум, имеет вид:

$$W_{PKC}^{CO}(s) = W_{PC}(s) \cdot W_{OY}(s) \cdot k_{oc}$$

$W_{PC}(s)$ – передаточная функция регулятора скорости

$W_{OY}(s) = W_{3PT}^{MO}(s) \cdot \Phi_0 \cdot \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{1}{J_\Sigma \cdot s} \cdot k_{oc}$ – передаточная функция объекта управления

Передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{PC}(s) = k_{PC} \frac{T_{PC} \cdot s + 1}{T_{PC} \cdot s}$$

Коэффициент пропорциональности контура скорости:

$$k_{PC} = \frac{J_{ДВ} \cdot k_{OT}}{T_{\mu T} \cdot \Phi_0 \cdot 1,5 \cdot z_p \cdot k_{oc}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,3}{0,0001 \cdot 0,256 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,032} = 1,12$$

Постоянная времени регулятора скорости:

$$T_{PC} = a_c \cdot b_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,0001 = 0,0008 \text{ сек}$$

$a_c = 2$, $b_c = 2$ - коэффициенты оптимизации контура скорости по СО

Ожидаемые показатели качества работы контура скорости:

Используя функцию линейного анализа замкнутого контура получим график переходного процесса (рисунок 2.3.2).

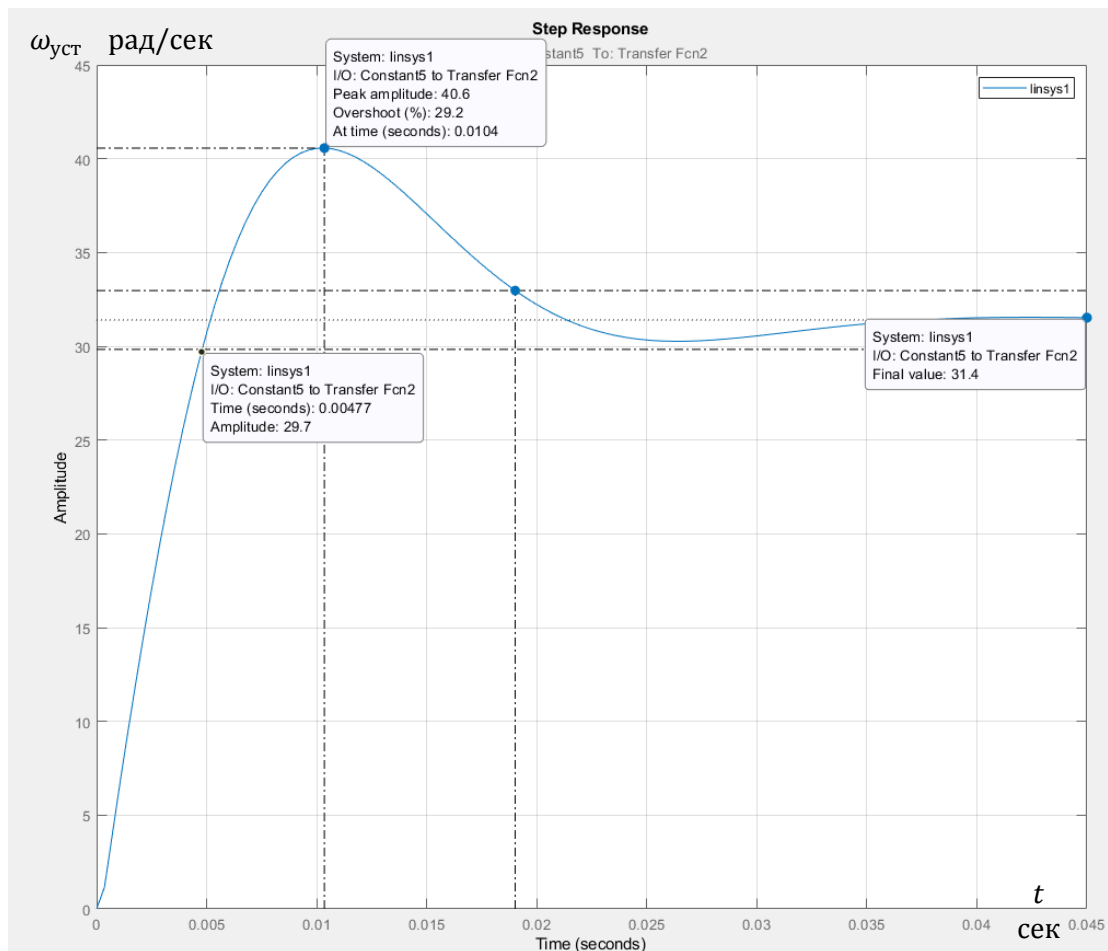


Рисунок 2.3.2. График переходного процесса в контуре скорости

По графику видно, что:

1. установившаяся ошибка $\Delta\omega_{уст} = 0$
2. перерегулирование $\sigma = 29,2\%$
3. время первого 5% зону при отработке ступенчатого задания: $t_{py1} = 0,00477 \text{ сек}$

Для уменьшения перерегулирования необходимо установить фильтр на входе контура. Переходной процесс пуска двигателя с фильтром на входе контура, представлен на рисунке 2.3.3.

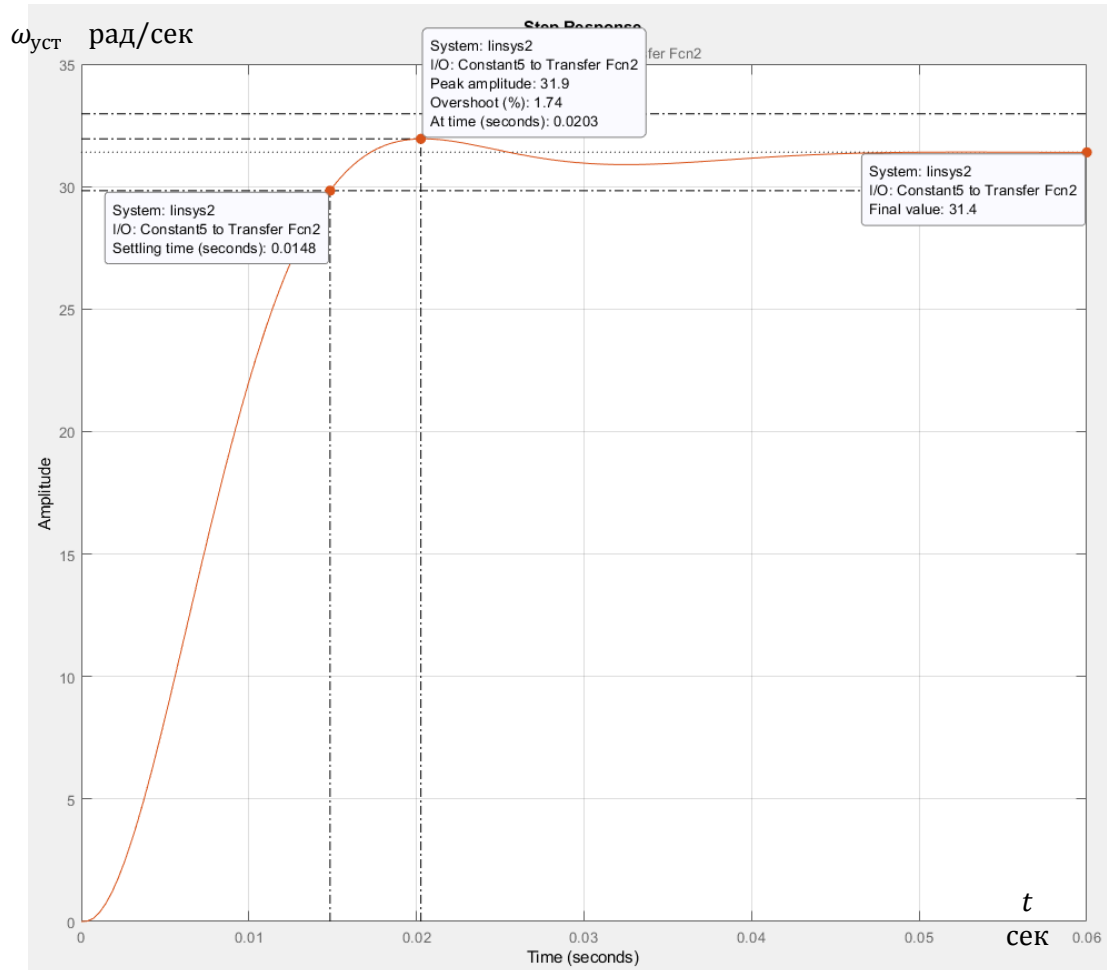


Рисунок 2.3.3. График переходного процесса в контуре скорости с фильтром на входе

Как видно из графика переходного процесса в контуре скорости, перерегулирование сильно уменьшилось, и составило $\sigma = 1,74\%$.

2.4 Оптимизация контура положения

Структурная схема контура положения с безынерционной обратной связью представлена на рисунке 2.4.1.

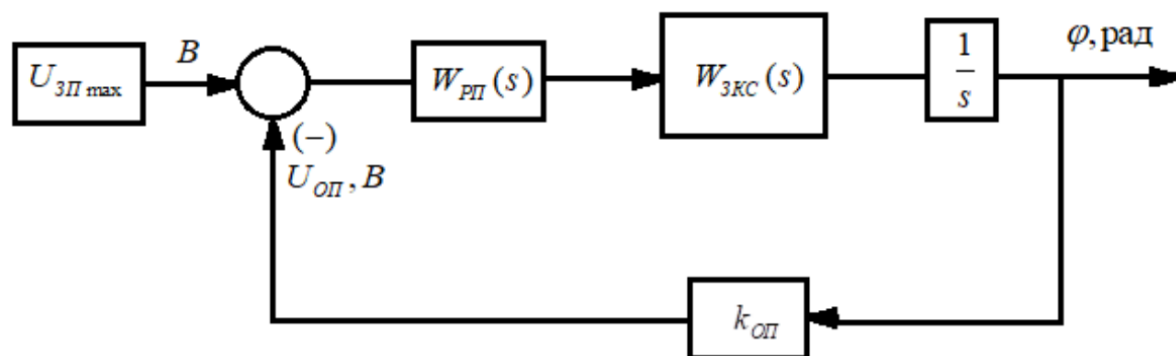


Рисунок 2.4.1. Структурная схема контура положения

На валу двигателя расположен инкрементный энкодер, имеющий разрешение 262144 дискрет на один оборот вала. Зададимся заданием по перемещению рамки на 10 см.

Здесь, $U_{3П max} = 10$ В - максимальное задание по положению, которое соответствует $262144 \cdot 20 = 5242880$ меток энкодера, учитывая, что при перемещении рамки задействуется ШВП с шагом 5 мм на один оборот двигателя.

Коэффициент обратной связи по положению:

$$k_{ОП} = \frac{262144 \cdot U_{3П max}}{5242880 \cdot 2\pi} = \frac{262144 \cdot 10}{5242880 \cdot 2 \cdot 3,14} = 0,08$$

Для оптимизации контура положения по МО выбирается П-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{РП}(s) = \frac{k_{ОС}}{2 \cdot T_{\muП} \cdot k_{ОП}}$$

Здесь, малая постоянная времени контура положения принимается равной, постоянной времени контура скорости, поэтому передаточная функция П-регулятора равна:

$$W_{\text{РП}}(s) = \frac{0,032}{2 \cdot 0,0008 \cdot 0,08} = 250$$

При частоте вращения двигателя $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин, на один оборот будет уходить 0,02 сек. Таким образом, при шаге ШВП 5 мм на один оборот, расчетное время перемещения должно составить:

$$t_{\text{перемещ 10см}} = 0,02 \cdot \frac{100}{5} = 0,4 \text{ сек}$$

3. Имитационное моделирование следящего электропривода

На основании математического описания синхронной машины с постоянными магнитами, рассмотренного в предыдущих разделах, построим имитационную модель синхронного двигателя во вращающейся системе координат dq . Имитационная модель, синтезированная в программе Matlab Simulink представлена на рисунке 3.1.

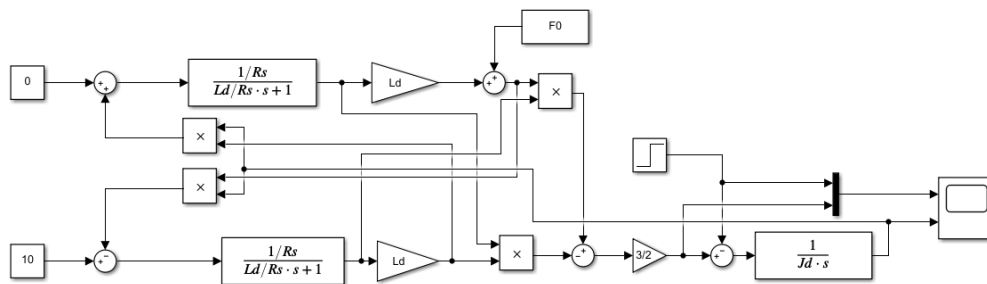


Рисунок 3.1. Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат

На основании расчётов, проведенных в прошлых разделах, смоделируем контур тока, скорости и положения для синхронного двигателя. Модель регулируемого синхронного электропривода во вращающейся системе координат представлена на рисунке 3.2.

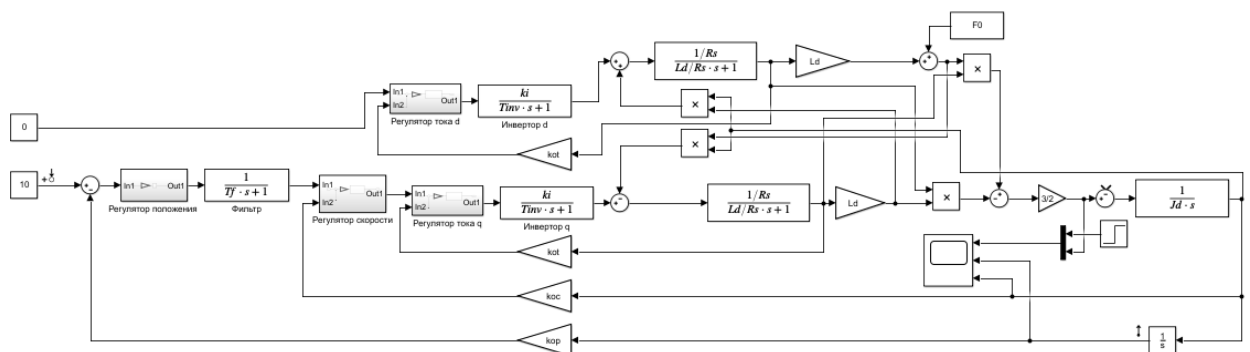


Рисунок 3.2. Модель регулируемого синхронного электропривода

На рисунке 3.3 представлены графики переходных процессов момента, тока контура q и частоты вращения в рад/сек.

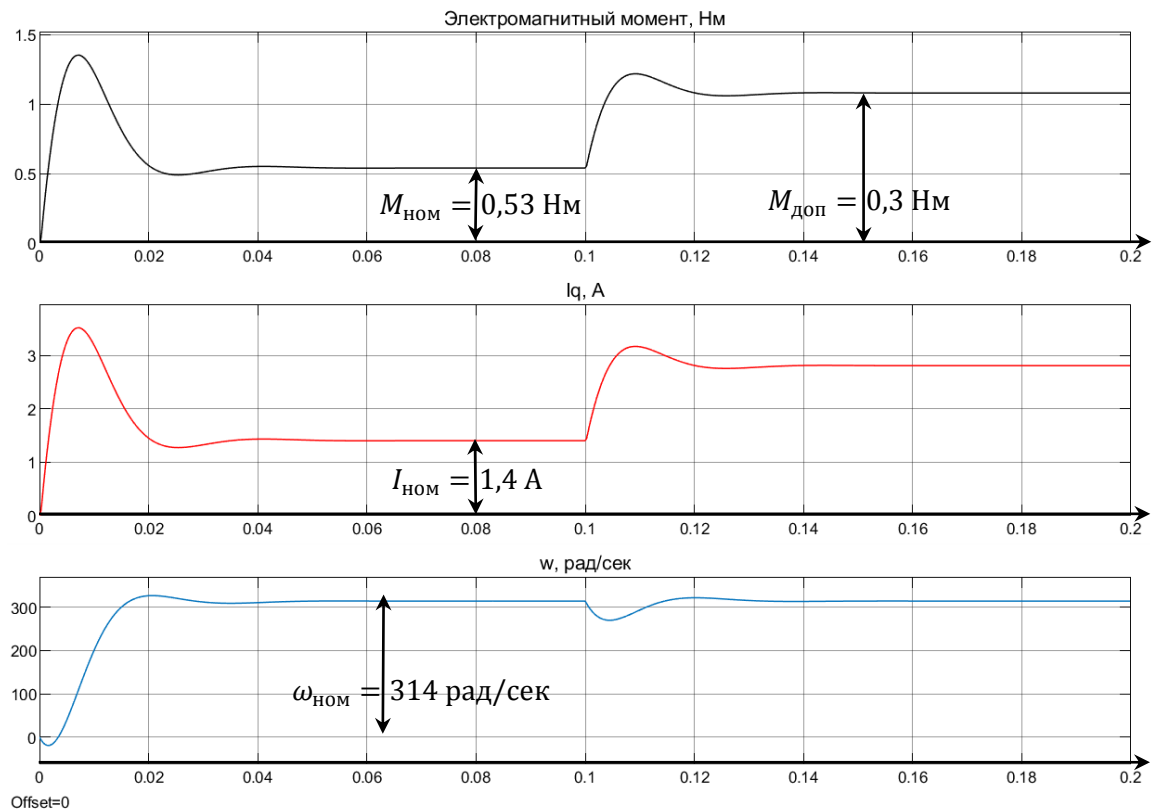


Рисунок 3.3. График пуска синхронного двигателя и наброса нагрузки

Пуск двигателя осуществляется при номинальной нагрузке $M_{ном} = 0,53 \text{ Нм}$. В момент времени $t = 0,1 \text{ сек.}$ происходит наброс нагрузки на вал двигателя равный $M_{доп} = 0,3 \text{ Нм}$. Как видно из результатов построения графиков, изменения значения частоты вращения не происходит, а значит система обрабатывает адекватно.

На рисунке 3.4 отражены результаты моделирования контура положения согласно заданию по перемещению на 10 см.

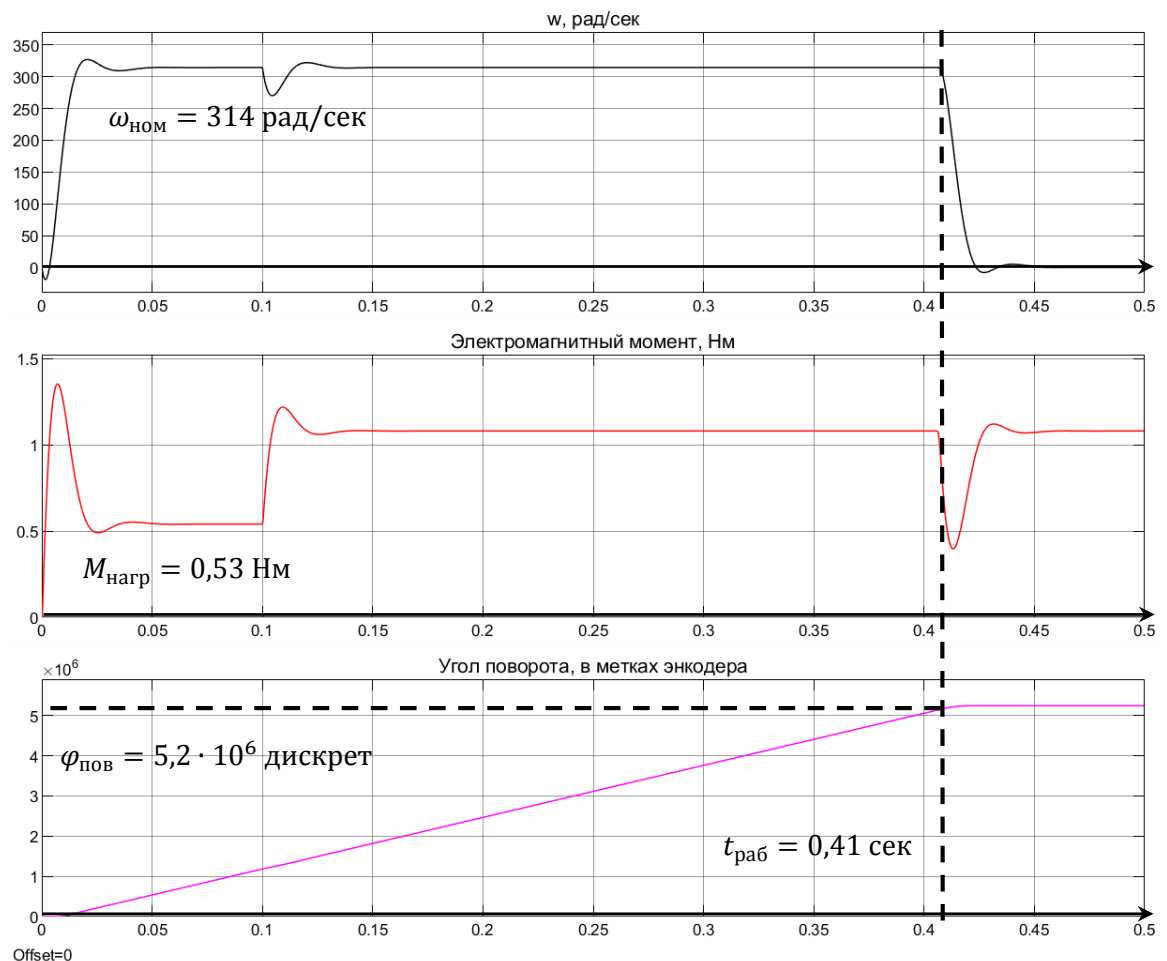


Рисунок 3.4. Графики тока, угла поворота и частоты вращения при максимальном задании

Как можно заметить по результатам построения графиков, двигатель останавливается при проходе заданного расстояния. Замкнутый контур регулирования, с П-регулятором положения, обладает астатизмом по управлению первого порядка, поэтому ступенчатое воздействие, в виде прямого нарастания сигнала, будет отрабатываться без установившейся ошибки, а в режиме отработки сигнала по положению будут накапливаться ошибки, пропорциональные производным от сигнала задания. Для минимизации этих ошибок применяется скоростная компенсация.

На рисунке 3.5 показаны графики линейно нарастающего задания по положению, и значение текущего положения вала двигателя. Как можно судить из графиков, в начале отслеживания ошибка накапливается, но в последствии её значение остается неизменным.

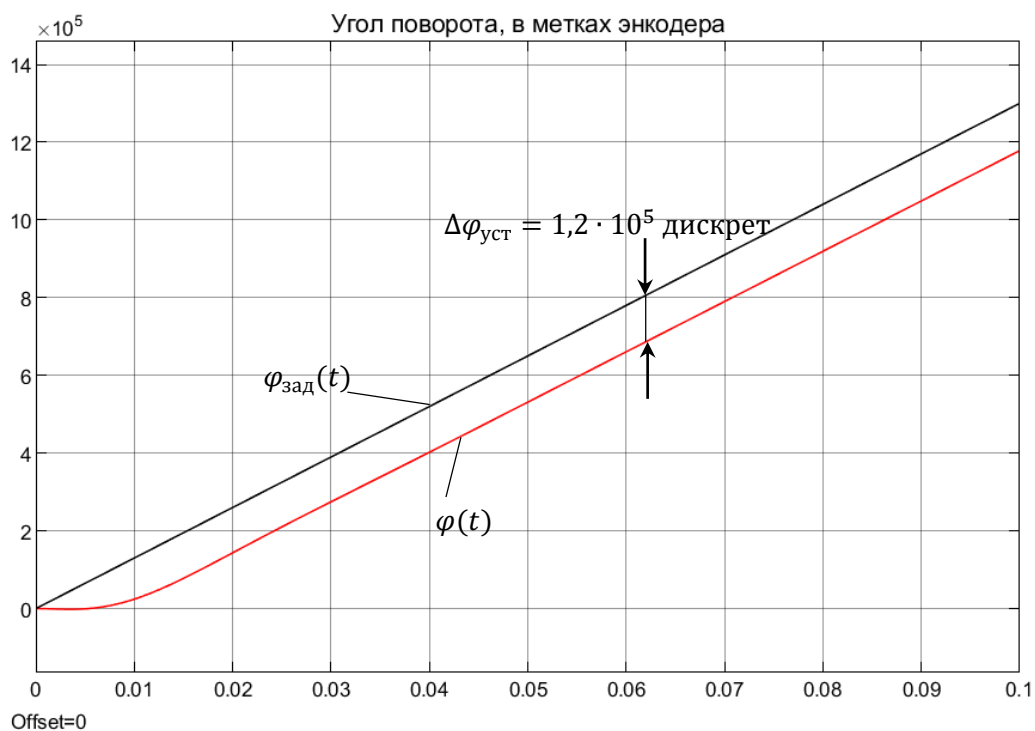


Рисунок 3.5. Графики линейного задания и текущего положения вала ротора

Выводы по разделу

В процессе написания выпускной квалификационной работы был исследован следящий электропривод установки пробойника отверстий в листе печатной платы, на основе синхронного двигателя. В результате моделирования были построены переходные характеристики пуска, набора скорости, поддержания момента, и точного перемещения по координате.

В результате моделирования было подтверждено, что данный двигатель удовлетворяет условиям по поддержанию постоянного момента, а также обеспечивает заданную точность перемещения. Выявленная в ходе расчетов погрешность является незначительной, и не влияет на результаты работы системы.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и сформировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной ВКР – разработка технологии производства металло-керамических печатных плат на основе низкотемпературной совместно спекаемой керамики.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

В ходе исследования были рассмотрены две конкурирующие разработки керамических печатных плат, состоящих из различных материалов:

1. Низкотемпературная совместнотемпеламая керамика
2. Высокотемпературная совместнотемпеламая керамика на основе оксида алюминия

Детальный анализ необходим, так как каждый тип керамики имеет свои достоинства и недостатки. В таблице 4.1.1.1 показано сравнение разработок конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4.1.1.1 – Сравнение конкурентных технических решений
(разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{k1}	B_{k2}	K_{ϕ}	K_{k1}	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,3	5	5	4	1,5	1,5	1,2
2. Трещиностойкость	0,05	5	2	3	0,25	0,1	0,15
3. Ударопрочность	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
4. Стабильность соединения с подложкой	0,07	4	3	3	0,28	0,21	0,21
5. Простота изготовления	0,03	3	4	5	0,09	0,12	0,15
6. Эффективность работы	0,2	5	5	3	1	1	0,6
7. Безопасность	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32

Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена сырья	0,02	4	3	5	0,08	0,06	0,1
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
3. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,2	5	5	2	1	1	0,6
Итого	1	43	39	35	5,12	4,96	3,78

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,3 \cdot 5 = 1,5$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что исследование является наиболее актуальным и перспективным, имеет конкурентоспособность.

4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4.1.2.1.

Таблица 4.1.2.1 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Высокие технические характеристики готового продукта.	Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.
С2. Отличные показатели при прохождении испытаний.	Сл2. Дороговизна разработки.
С3. Актуальность и новизна разработки.	Сл3. Высокие требования к производственному оборудованию.
С4. Экологичность технологии.	Сл4. Низкие показатели прочности.
С5. Квалифицированный персонал.	Сл5. Вероятность получения брака.
Возможности	Угрозы
В1. Потенциально высокий спрос на разработку.	У1. Снижение стоимости разработок конкурентов.
В2. Дальнейшее усовершенствование технологии.	У2. Появление зарубежных аналогов.
В3. Внедрение технологии в аэрокосмической и оборонной отраслях.	У3. Устаревание и износ принципиально важного для работы оборудования
В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	У4. Сильная зависимость от поставок материалов.

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.1.2.2 – 4.1.2.5.

Таблица 4.1.2.2 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	-	-	-
	B2	+	-	+	-	-
	B3	+	+	+	-	-
	B4	+	+	-	-	-

Таблица 4.1.2.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	-	-	-	-	-
	B2	-	+	+	+	+
	B3	-	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-	-

Таблица 4.1.2.4 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		С1	С2	С3	С4	С5
	У1	-	-	-	-	-
	У2	+	-	-	-	-
	У3	+	-	-	-	-
	У4	-	-	-	-	-

Таблица 4.1.2.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	-	+	-	-	-
	У2	-	-	-	-	-
	У3	-	-	+	-	-
	У4	-	-	-	-	-

Результаты анализа представлены в итоговой таблице 4.1.2.6.

Таблица 4.1.2.6 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	Сильные стороны производства С1. Высокие технические характеристики готового продукта. С2. Отличные показатели при прохождении испытаний. С3. Актуальность и новизна разработки. С4. Экологичность технологии. С5. Квалифицированный персонал.	Слабые стороны производства Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований. Сл2. Дороговизна разработки. Сл3. Высокие требования к производственному оборудованию. Сл4. Низкие показатели прочности. Сл5. Вероятность получения брака.
Возможности В1. Потенциально высокий спрос на разработку. В2. Дальнейшее усовершенствование технологии. В3. Внедрение технологии в аэрокосмической и оборонной отраслях. В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	Направления развития Высокие технические показатели готового продукта позволяют заявить его в качестве лучшей альтернативы уже имеющимся образцам продукции на рынки. Ввиду конечной стоимости готового продукта, а также, принимая во внимание стоимость похожих решений у конкурентов, важно сосредоточиться на оборонной и авиакосмической отраслях, так как технические характеристики рассматриваемого продукта более высоки.	Сдерживающие факторы Постепенный износ оборудования, а также применение в технологии дорогостоящих импортных материалов.
Угрозы В1. Потенциально высокий спрос на разработку. В2. Дальнейшее усовершенствование технологии. В3. Внедрение технологии в аэрокосмической и оборонной отраслях. В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	Угрозы развития У2С1. Несмотря на наличие технического преимущества (на сегодняшний день), нельзя исключать возможность сокращения технического опережения перед конкурентами У3С1. Постоянная модернизация производственного оборудования ставит задачу постоянного усовершенствования технологии производства.	Уязвимости: У1Сл2. Необходимо постоянно стремиться к снижению себестоимости производства при неизменном качестве продукции. У3Сл3. Постоянно возрастающие требования к оптимизации производственного процесса диктуют решения по модернизации и улучшения фонда производственного оборудования.

В результате SWOT-анализа показано, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Данные недостатки, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности для их устранения. Результаты анализа учтены в дальнейшей научно-исследовательской разработке.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ

осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.2.1.1.

Таблица 4.2.1.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Начальник лаборатории
	2	Календарное планирование выполнения работ по производству	Начальник лаборатории
Изготовление опытных образцов	3	Первоначальная проектировка макетных образцов	Инженер-технолог
	4	Изготовление опытных образцов	Инженер-технолог
Исследование экспериментальной продукции	5	Планирование испытания	Инженер-технолог
	6	Подготовка образцов для испытания	Инженер-технолог
	7	Проведение испытания	Инженер-технолог
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер-технолог
	9	Оценка целесообразности запуска в серию	Начальник лаборатории
Оформление отчета (комплекта технической документации)	10	Составление пояснительной записки	Начальник лаборатории

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож } i} = \frac{3 \cdot t_{\text{min } i} + 2 \cdot t_{\text{max } i}}{5}$$

$t_{\text{ож } i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{ож i}}{Ч_i}$$

T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ож i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}$$

$T_{ki.инж}$ – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

$T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – общее количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.2.2.1.











Таблица 4.2.2.1 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{p\ i}$	Длительность работ в календарных днях $T_{k\ i.инж}$
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож\ i}$, чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	2	-	4	-	2,8	-	2,8	4
2. Календарное планирование выполнения работ по производству	1	-	3	-	1,8	-	1,8	3
3. Первоначальная проектировка макетных образцов	-	5	-	10	-	5	5	7
4. Изготовление опытных образцов	-	4	-	6	-	4,8	4,8	7
5. Планирование испытания	-	2	-	4	-	2,8	2,8	4
6. Подготовка образцов для испытания	-	3	-	5	-	3,8	3,8	6
7. Проведение испытания	-	14	-	28	-	19,6	19,6	29
8. Обработка полученных данных	-	3	-	5	-	3,8	3,8	6
9. Оценка целесообразности запуска в серию	2	-	4	-	2,8	-	2,8	4
10. Составление пояснительной записки	10	-	14	-	11,6	-	11,6	17
Итого:	15	31	25	58	21,8	39,8	58,8	87

Примечание: Исп. 1 – начальник лаборатории, Исп. 2 – инженер-технолог.


На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.2.2.2).

Таблица 4.2.2.2 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность работ											
				февр			март			апр			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп1	4												
2	Календарное планирование выполнения работ по производству	Исп1	3												
3	Первоначальная проектировка макетных образцов	Исп2	7												
4	Изготовление опытных образцов	Исп2	7												
5	Планирование испытания	Исп2	4												
6	Подготовка образцов для испытания	Исп2	6												
7	Проведение испытания	Исп2	29												
8	Обработка полученных данных	Исп2	6												
9	Оценка целесообразности запуска в серию	Исп1	4												
10	Составление пояснительной записки	Исп2	17												

Примечание:



– Исп. 1 (начальник лаборатории),  – Исп. 2 (инженер-технолог)

4.2.3 Бюджет научно-технического исследования и запуска продукции в серию

При планировании бюджета научно-технического исследования учитываются все виды расходов, связанные с его выполнением. В этой работе используются следующие группировки затрат, по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

4.2.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

Данная часть включает затраты всех материалов, используемых при получении образца готовой продукции. Результаты расчета затрат представлены в таблице 4.2.3.1.1.

Таблица 4.2.3.1.1 – Затраты на получение образца готовой продукции

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Лист керамики	шт	4	3000	12000
Паста для трафаретной печати	гр.	10	100	1000
Сетка для трафаретной печати	пог.м.	2	10000	20000
Пакет для изостатического прессования	шт.	1	200	200
Подложка для спекания Al_2O_3	шт.	2	500	1000
Перчатки	пар	3	20	60
Итого:				24260

4.2.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}$$

n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} m$$

$И$ – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Таблица 4.2.3.2.1 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	H_A , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Формирователь переходных отверстий PAM-8SM	1	15	0,3	7	12000000	21000
2	Принтер трафаретной печати P-200SM	1	20	0,16	5	13000000	8667
3	Ультрафиолетовый лазер LPKF ProtoLaser U3	1	10	0,3	10	18000000	45000
4	Установка для изостатического прессования IS-500SM	1	20	0,16	5	5000000	3333
5	Высокотемпературная печь Nabertherm L-3	1	20	0,3	5	250000	3750
6	Установка дисковой резки ADT 7100	1	10	0,1	10	15000000	12500
Итого:		94250 руб.					

4.2.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера-технолога и начальника лаборатории, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p$$

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.;

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя начальника лаборатории):

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{51285 \cdot 11,2}{213} = 2696,7 \text{ руб.}$$

$З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

При отпуске в 28 рабочих дней – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.}$$

Должностной оклад работника за месяц:

1. для начальника лаборатории:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

2. для инженера-технолога:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}$$

$З_{\text{тс}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равен 0,3;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равен 1,3.

Таблица 4.2.3.3.1 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Начальник лаборатории	Инженер-технолог
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней выходные дни/праздничные дни	52/14	52/14
Потери рабочего времени отпуск/невыходы по болезни	24/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	213	213

Таблица 4.2.3.3.2 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители	$Z_{тс}$	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m руб	$Z_{дн}$ руб	T_p раб.дн	$Z_{осн}$ руб
Начальник лаборатории	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2696,7	21,8	58788,1
Инженер-технолог	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	39,8	69375,4
Итого:								128163,4

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

1. для начальника лаборатории:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 69375,4 = 10406,1 \text{ руб.}$$

2. для инженера-технолога:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 58788,1 = 8818,2 \text{ руб.}$$

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

4.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

1. для начальника лаборатории:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (69375,4 + 10406,1) = 23934,4 \text{ руб.}$$

2. для инженера-технолога:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (58788,1 + 8818,2) = 20281,9 \text{ руб.}$$

$k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.2.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать, ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 4.2.3.5.1 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
94250	24260	128163,4	19224,3	44216,3	310114

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 - 5) \cdot k_{\text{пр}} = 310114 \cdot 0,2 = 62022,8 \text{ руб.}$$

$k_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости разработки печатной платы на основе низкотемпературной керамики по форме, приведенной в таблице 4.2.3.5.2. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 4.2.3.5.2 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИР	24260	20623	15945	Пункт 4.2.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	94250	82362	91257	Пункт 4.2.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	128163	148391	133962	Пункт 4.2.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	19224	44517	40189	Пункт 4.2.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	44216	57872	52245	Пункт 4.2.3.4
6	Накладные расходы	62023	70753	66720	Пункт 4.2.3.5
Бюджет затрат НИР		372136	424518	400318	Сумма ст. 1- 6

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования и внедрения в производство, путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве аналогов данной НИР рассмотрены:

1. Металлокерамические корпуса для МИС СВЧ из керамики на основе оксида алюминия, производства АО «ЗПП» г. Йошкар-Ола
2. Металлокерамические корпуса для МИС СВЧ из керамики на основе оксида алюминия, производства АО «НПП Старт» г. Великий Новгород

$$I_{\text{фин р}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{р } i}}{\Phi_{\text{max}}}$$

$I_{\text{фин р}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{\text{р } i}$ – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 298660$ руб. $\Phi_{\text{исп.1}} = 424518$ руб. $\Phi_{\text{исп.2}} = 400318$ руб.

$$I_{\text{фин р}}^{\text{тек.пр}} = \frac{\Phi_{\text{текущ.проект}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{372136}{424518} = 0,87$$

$$I_{\text{фин р}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{\text{исп.1}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{424518}{424518} = 1$$

$$I_{\text{фин р}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{400318}{424518} = 0,94$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 1 (текущий проект) с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.3.1).

Таблица 4.3.1 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Безопасность при использовании установки	0,15	4	4	4
2. Стабильность работы	0,2	4	4	5
3. Технические характеристики	0,2	5	3	4
4. Механические свойства	0,3	5	4	3
5. Материалоёмкость	0,15	5	4	5
ИТОГО	1	4,65	3,8	4,05

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 4,65$$

$$I_{p2} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,8$$

$$I_{p3} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 3 + 0,15 \cdot 5 = 4,05$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{\text{р-исп.}i}}{I_{\text{фин р}}^{\text{исп.}i}}$$

$$I_{\text{исп.}1} = \frac{I_{p1}}{I_{\text{фин р}}^{\text{тек.пр}}} = \frac{4,65}{0,87} = 5,34$$

$$I_{\text{исп.}2} = \frac{I_{p2}}{I_{\text{фин р}}^{\text{исп.}1}} = \frac{3,8}{1} = 3,8$$

$$I_{\text{исп.}3} = \frac{I_{p3}}{I_{\text{фин р}}^{\text{исп.}2}} = \frac{4,05}{0,94} = 4,3$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравниваются с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 4.3.2).

Таблица 4.3.2 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,87	1	0,94
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	3,8	4,05
3	Интегральный показатель эффективности	5,34	3,8	4,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,71	0,8

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для начальника лаборатории и инженера-технолога был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней для выполнения работ составляет 87 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер-технолог, составляет 59 дней; общее количество дней, в течении которых работал начальник лаборатории, составляет 28 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 372136 руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1. значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,87, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2. значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,65, по сравнению с 3,8 и 4,05;

3. значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,34, по сравнению с 3,8 и 4,3, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

5. Социальная ответственность

Введение

Современный мир сложно представить без устройств связи, управления, цифровой обработки сигналов и прочих изделий микроэлектронной промышленности. Непрерывно ускоряющееся развитие техники диктует свои требования к производственным решениям и процессам. Следуя трендам миниатюризации, микросхемы электроники становятся все меньше, а частоты их работы все выше, в следствие чего возникает потребность в материалах, свойства которых максимально соответствуют заявленным частотам.

В настоящий момент производство металлокерамических плат, способных работать на частотах от 5 ГГц и выше, является одним из приоритетов отечественной электронной промышленности, благодаря чему разработка отечественных материалов получила ощутимый толчок.

Актуальность работы, проведенной в разделе социальная ответственность, в первую очередь, проявляется анализе работы на предприятии, выявлении опасных и вредных факторов производства, оптимизации производства и выявлении нарушения норм безопасности.

В ходе выполнения ВКР рассматривается привод установки для формирования переходных отверстий в печатной плате, на основе LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramic). Данный привод обеспечивает движение рамки захвата с керамическим листом по одной из координат (X-координата, Y-координата) с заданной точностью. Дополнить введение с токи зрения СО

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

Согласно ТК РФ, №197-ФЗ [18] каждый работник имеет право на:

1. Рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
2. Обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
3. Получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
4. Отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
5. Обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
6. Обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
7. Личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;

5.2.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

В качестве организационных мероприятий при компоновке рабочей зоны рассмотрим основные критерии, предъявляемые к рабочим местам.

Прежде всего, рабочее место должно отвечать требованиями безопасности труда. Кроме того, оно должно быть удобным, то есть соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также типу работы.

При проектировании рабочего места необходимо учитывать: рабочую позу, пространство для размещения работника, возможность вести записи, размещать документацию и материалы, необходимые для работы.

Рабочее место следует организовать так, чтобы работник мог легко перемещаться в процессе трудовой деятельности, совершать все движения, необходимые для обслуживания оборудования, хорошо воспринимать звуковую и зрительную информацию.

Принимая во внимание особенности производства, работодателем могут устанавливаться для работников различные режимы рабочего времени, в зависимости от сложности и вредности различных категорий работ.

Применение сверхурочных работ допускается в случаях, предусмотренных статьей 99 [13] Трудового кодекса Российской Федерации. Сверхурочные работы не должны превышать для каждого работника четырех часов в течение двух дней подряд и 120 часов в год.

Оплата сверхурочной работы производится в соответствии со статьей 152 [14] Трудового кодекса Российской Федерации.

5.3 Производственная безопасность

В ходе проведения общего анализа производственного процесса были выявлены следующие опасные и вредные факторы. Для более наглядного представления результатов сведем их в все в таблицу 5.3.1.

Таблица 5.3.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»*[21] г) опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего: температурой и относительной влажностью воздуха, скоростью движения (подвижностью) воздуха относительно тела работающего
2. Превышение уровня шума	+	+	+	СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»*[15] ж) опасные и вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде и характеризующиеся: 1) повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума; 2) повышенным уровнем инфразвуковых колебаний (инфразвука); 3) повышенным уровнем ультразвуковых колебаний (воздушного и контактного ультразвука);
3. Воздействие химических веществ на организм человека	+	+	+	ГН 2.2.5.3532-18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны"*[17]

5.4 Анализ опасных и вредных производственных факторов

5.4.1 Отклонение показателей микроклимата

Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 5.4.1.1 применительно к выполнению работ различных категорий в холодный и теплый периоды года.

Таблица 5.4.1.1 Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Температура воздуха °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
					для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	19,0-20,9	23,1-24,0	18,0-25,0	15-75	0,1	0,2
Теплый	20,0-21,9	24,1-28,0	19,0-29,0	15-75	0,1	0,3

Профилактика перегрева организма работника в нагревающем микроклимате включает следующие мероприятия: регламентация продолжительности воздействия нагревающей среды для поддержания среднесменного теплового состояния на оптимальном или допустимом уровне; использование специальных средств коллективной и индивидуальной защиты, уменьшающих поступление тепла извне к поверхности тела человека и обеспечивающих допустимый тепловой режим.

Защита от охлаждения осуществляется посредством: одежды, изготовленной в соответствии с требованиями государственных стандартов; использования локальных источников тепла, обеспечивающие сохранение должного уровня общего и локального теплообмена организма.

5.4.2 Превышение уровня шума

Источником возникновения данного фактора является работающее оборудование, преобразователи напряжения, работающее осветительные приборы дневного света, а также шум вентиляторов вытяжки и приточной вентиляции. Шум вызывает головную боль, быструю утомляемость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, ухудшается память, снижает реакцию.

Эффективным путем решения проблемы шума является снижение его уровня в самом источнике за счет изменения технологии и конструкции машин.

Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах, согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [23], с учетом трудовой деятельности в проектируемом помещении, приведены в таблице 5.4.2.1.

Таблица 5.4.2.1 Предельно допустимые уровни звукового давления

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления (дБ), в активных полосах со среднегеометрическими частотами Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)
Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, измерительные и аналитические работы в лаборатории	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	60
	93	79	70	68	58	55	52	52	49	

К индивидуальным средствам защиты следует отнести звукопоглощающие наушники, а также четкое разделение зоны труда и зоны отдыха, уровень шума в которой не будет превышать допустимых норм.

5.4.3 Воздействие химических веществ на организм человека

При работе в цеху работник может контактировать с химическими веществами, ПДК которых указаны в таблице 5.4.3.1.

Вещество	Величина ПДК, мг/м ³	Класс опасности	Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства	Влияние на организм
Ацетон	200	4	Газообразное	Ацетон обладает наркотическим действием. При продолжительном вдыхании паров ацетон накапливается в организме, может всасываться через неповрежденную кожу.
Спирт этиловый	1000	4	Газообразное	Спирт этиловый обладает наркотическим и токсическим действием. Угнетает функцию ЦНС, способен вызвать ступор, нечувствительность к боли, кому.
Диметилфталат	0,3	2	Газообразное	Имеет нейротоксическое и нефротоксическое действие; быстрый метаболизм с образованием метилового спирта.

Содержание вредных химических веществ в воздухе рабочей зоны должно удовлетворять ГОСТ 12.1.005 и дополнениям к перечню ПДК N 4617-88, а также ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» [17].

Работники должны обеспечиваться специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты, в соответствии с Межотраслевыми правилами обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты.

5.6 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность производственных процессов, в настоящее время, становится все актуальнее. Постепенные процессы изменения климата, плохая экология, и, как следствие, рост заболеваемости наблюдаются по всему миру, в том числе и в России.

Рассматривая вопросы воздействия на экологию, необходимо провести анализ факторов, способных нанести вред окружающей среде. Учитывая специфику производства, в первую очередь, это загрязнение атмосферы вредными испарениями и отходами пайки, грязные стоки, которые являются отходами производства, а также твёрдые отходы, в виде мусора.

В производственном помещении должны обеспечиваться все меры по обеспечению экологической безопасности города. Вредные выбросы в атмосферу должны проходить через систему фильтрации, обеспечивающие максимально возможную очистку выходного воздуха от продуктов горения, пайки, тяжелых металлов и их оксидов.

Стоки предприятия должны проходить двойную очистку, прежде чем попасть в общую канализационную систему. Сооружения очистки стоков представляет собой два барьера из фильтров, в виде механической очистки от твердых частиц и физико-химической очистки.

Твердые бытовые отходы на предприятии должны сортироваться по классам. Отходы, содержащие драгоценные и цветные металлы, отвозиться на переработку и восстановление. Остальной мусор должен вывозиться на общие полигоны.

5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

По природе возникновения ЧС можно разделить на техногенные, природные, экологические, антропогенные, социальные и комбинированные.

Исходя из специфики производства, наиболее вероятный тип ЧС – техногенный. Для примера разберем вероятность пожара на предприятии, укажем превентивные меры по предупреждению возникновения и разработаем порядок действия в результате возникновения ЧС и меры по ликвидации её последствий.

Наиболее вероятный источник пожара на предприятии – процесс спекания изделий, так как во время работы установки температура внутри камеры поднимается до 850°C и выше.

В качестве превентивных мер по недопущению пожароопасной обстановки, необходимо заранее продумывать установку оборудования, работающего на повышенной температуре. В помещении необходимо разместить огнетушители на видных местах. Все противопожарные системы и установки с автоматическим управлением (противопожарные сигнализации, механические двери, системы подачи воды и т.д.) необходимо содержать в исправности, регулярно проводить проверки, ремонт и замену по необходимости. Специальная одежда и оборудование (защитные костюмы, маски, перчатки и сапоги) должны находиться в аккуратно сложенном или подвешенном виде в железных шкафах, расположенных в отдельных помещениях. После каждой рабочей смены помещения и оборудование необходимо осматривать, проверять, убирать и чистить.

Выводы по разделу

В ходе анализа результатов раздела социальная ответственность была проанализирована безопасность труда на предприятии по сборке микроэлектронных компонентов.

При выявлении опасных и вредных факторов был проанализирован весь производственный процесс, в ходе которого были выявлены вероятные угрозы жизни и здоровью работников. В ходе анализа были даны рекомендации по минимизации вреда для здоровья сотрудников во время производственного процесса в соответствии с действующими ГОСТами и СНиПами. Также были даны общие рекомендации по организации пожарной безопасности.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был рассчитан следящий электропривод станка формирования отверстий РАМ-8SM. Был произведен расчет оптимизации контура тока, в результате которого были построены характеристики, анализ которых указывает на малое перерегулирование тока при пуске. При оптимизации контура скорости были также получены характеристики переходных процессов при пуске двигателя, в результате которых были получены значения перерегулирования $\sigma = 29,2\%$, что показало необходимость установки фильтра на входе контура. График переходного процесса пуска двигателя, после установки фильтра показал перерегулирование $\sigma = 1,74\%$, что соответствует норме.

Моделирование пуска двигателя в среде Matlab Simulink позволило проанализировать верность расчетов, а также наглядно показать отработку двигателем сигнала по положению. Незначительное отличие теоретических расчетов, от расчетов, полученных при моделировании, объясняется погрешностью результатов измерений.

Conclusion

In the course of the final qualification work, the follow-up electric drive of the PAM-8SM hole forming machine was calculated. A calculation was made of the optimization of the current loop, as a result of which characteristics were constructed, the analysis of which indicates a small overshoot of the current at start-up. When optimizing the speed loop, the characteristics of transients during engine start were also obtained, as a result of which overshoot values $\sigma = 29,2\%$ were obtained, which showed the need to install a filter at the input of the circuit. The graph of the transition process of starting the engine, after installing the filter showed an overshoot of $\sigma = 1,74\%$, which corresponds to the norm.

Simulation of the engine start in the Matlab Simulink environment allowed us to analyze the accuracy of the calculations, as well as to visually show the engine working out the signal by position. The insignificant difference of theoretical calculations from the calculations obtained during modeling is explained by the error of the measurement results.

Список литературы

1. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. – 298 с.
2. Полфунтиков Е.Ю. Тяговый двигатель с постоянными магнитами. / Сборник научных трудов НГТУ. – 2009, № 2(56). – С. 141–146.
3. Нургалеев А.Р., Павлова З.Х., Шабанов В.А. Перспективы использования вентильного электропривода в нефтяной и газовой промышленности. / Уфимский государственный нефтяной технический университет. – [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: http://www.rusnauka.com/13_EISN_2013/Tecnic/5_137070.doc.htm(дата обращения: 17.04.2020).
4. Корельский В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами. / Научный журнал «Радиоэлектроника. Информатика. Управление», 2001. - С. 155-159
5. Ковальчук Д.А., Мазур А.В. Векторное управление синхронным электродвигателем. // «Автоматизация технологических и бизнес-процессов». [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Одесса: Одесская национальная академия пищевых технологий. – 2014, №17 - С. 71-75. – Режим доступа: <http://dropdoc.ru/doc/453471/vektornoe-upravlenie-sinhronnyelektrodvigatelem.pdf> (дата обращения: 17.04.2018).

6. Завьялов В.М, Абд Эль Вхаб А. Р. Дифференциальное управление моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. // «Современный электропривод». – 2012, № 1 – С. 8-15.

7. Ryvkin Sergey. Sliding mode for synchronouselectric drive / Eduardo Palomar Lever–CRC Press–2011, – 208 с. 71

8. Ворошилова О.Н. Исследование робастной системы управления вентильным электроприводом. // Автоматика и Электроника. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Николаев: Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова – Режим доступа: conference.nuos.edu.ua (дата обращения: 18.04.2018).

9. Глазунов В.Ф., Пикунов В.В., Репин А.А. Методика синтеза системы управления синхронным двигателем на основе синергетического подхода. // «Вестник ИГЭУ» – 2005, № 3.

10. Абд Эль Вхаб А. Р., Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. // «Известия Томского политехнического университета» – 2011, Т. 319, №4.

11. Горобец Н.М. Исследование современных сервоприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами. [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Донецк: ДонТУ – Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2009/eltf/gorobets/report/index.htm> (дата обращения: 21.04.2018).

12. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза. // «Электронные компоненты». – 2007, №2

13. Трудовой кодекс Российской Федерации «Статья 99. Сверхурочная работа»

14. Трудовой кодекс Российской Федерации «Статья 152. Оплата сверхурочной работы»

15. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»

17. ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны»

18. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От 24.04.2020)

19. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ от 6 апреля 2003 г.

20. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. Утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78.

21. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 1 октября 1996 г., N 21.

22. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Изд-во стандартов, М. – 1988.

23. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Минздрав России, Москва. – 1996.

24. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. Изд-во стандартов, М. – 1983.

25. ГОСТ 12.1.045-84. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Изд-во стандартов, М. – 1984. 103

26. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. Минздрав России, М. – 2003.

27. Новиков С.Г., Маслова Т.Н., Копылова Л.Н. Безопасность жизнедеятельности. Учебно-методический комплекс. Электронный учебник.

28. ГОСТ 12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Изд-во стандартов, М. – 1984.

29. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Изд-во стандартов, М. – 1984.

30. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Минздрав России, М. – 2003.

31. Правила устройств электроустановок. 6-е и 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 640 с.
32. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. Государственная противопожарная служба, Москва. – 2003.
33. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».